

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (46)

2023

СОДЕРЖАНИЕ

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

Егерева Ю. Б., Бахарев В. В.

ЦИФРОВЫЕ ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ КАК
ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРМАТ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
ЛОГИСТИЧЕСКИХ УСЛУГ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ5

Гамидуллаева Л. А., Финогеев А. Г.

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ
ТУРИСТСКОГО ПРОДУКТА В РЕГИОНЕ25

Куликова Т. А., Балахонова Е. В.

ФОРСАЙТ В УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....42

Некрылова Н. В., Хохлова И. Г., Кузнецова Т. В.

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ
ПРОГРАММ РАЗВИТИЯ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ
В РАМКАХ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ РОССИИ.....62

Суровицкая Г. В.

МОДЕЛИ РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННОЙ
ПОЛИТИКИ УНИВЕРСИТЕТОВ77

<i>Зинченко С. В., Бижанова Е. М.</i> ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В МУНИЦИПАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ	87
--	----

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

<i>Додонова Е. А., Дубинина И. Н., Головнин О. К., Иващенко А. В.</i> МЕТОД ВЕТВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ.....	111
---	-----

<i>Смирнов Ю. Г., Гундарев Е. А.</i> ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РАБОТЫ СЕРДЦА ПО СЕГМЕНТАРНЫМ КРИВЫМ В ТРЕХ НАПРАВЛЕНИЯХ.....	128
--	-----

<i>Толкович Д. В.</i> ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИМЕРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В МАКЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	144
---	-----

<i>Геращенко С. М., Демидов А. В.</i> СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛИЗИСТОЙ ПОЛОСТИ РТА И ПАРОДОНТА.....	154
--	-----

<i>Бождай А. С., Свиридова В. В.</i> МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕГИОНОВ	172
---	-----

<i>Хрящев В. В., Приоров А. Л.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ EFFICIENTNET В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПАТОЛОГИЙ ЖЕЛУДКА НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ ЭНДСКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	185
---	-----

<i>Кузнецова О. Ю., Кузнецов Р. Н., Кузьмин А. В.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ АНСАМБЛЕВОГО МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ.....	193
--	-----

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

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 2 (46)

2023

CONTENT

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

Egereva Yu.B., Baharev V.V.

DIGITAL LOGISTICS PLATFORMS AS AN INNOVATIVE
FORMAT FOR PROVIDING LOGISTICS SERVICES:
A CRITICAL ANALYSIS5

Gamidullaeva L.A., Finogeev A.G.

METHODS FOR MANAGING THE LIFE CYCLE
OF A TOURIST PRODUCT IN A REGION25

Kulikova T.A., Balakhonova E.V.

FORESIGHT IN INDUSTRIAL ENTERPRISE
DEVELOPMENT MANAGEMENT42

Nekrylova N.V., Khokhlova I.G., Kuznetsova T.V.

EXPRESS ASSESSMENT OF THE REGIONAL DEVELOPMENT
PROGRAMS EFFECTIVENESS IMPLEMENTED WITHIN
THE FRAMEWORK OF NATIONAL PROJECTS OF RUSSIA,
ON THE EXAMPLE OF PROGRAMS OF THE PENZA REGION62

Surovitskaya G.V.

MODELS FOR THE IMPLEMENTATION
OF INNOVATION POLICY OF UNIVERSITIES77

<i>Zinchenko S.V., Bijanova E.M.</i> ASSESSMENT OF THE TERRITORIAL POTENTIAL FOR THE DEVELOPMENT OF HOUSING CONSTRUCTION IN THE MUNICIPALITY	87
--	----

SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

<i>Dodonova E.A., Dubinina I.N., Golovnin O.K., Ivashchenko A.V.</i> TIME SCALE BRANCHING METHOD FOR THE SITUATION DEVELOPMENT SIMULATION IN THE DIGITAL HEALTHCARE MONITORING SYSTEM	111
<i>Smirnov Yu.G., Gundarev E.A.</i> NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING THE WORK OF THE HEART ALONG SEGMENTAL CURVES IN THREE DIRECTIONS	128
<i>Tolkovich D.V.</i> SIMULATION MODELING OF THE STRUCTURE OF A CONDUCTIVE POLYMER USED IN PROTOTYPE STUDIES OF BIOELECTRIC SIGNALS	144
<i>Gerashchenko S.M., Demidov A.V.</i> MODERN METHODS FOR ASSESSING THE CONDITION OF THE MUCOSUS CAVITY OF THE MOUTH AND PERIODONT	154
<i>Bozhday A.S., Sviridova V.V.</i> METHOD FOR NUMERICAL ASSESSMENT OF THE LEVEL OF DIGITAL TRANSFORMATION OF PRIORITY DIRECTIONS OF SOCIO-ECONOMIC PROCESSES OF THE REGIONS	172
<i>Khryashchev V.V., Priorov A.L.</i> THE USE OF THE EFFICIENTDET NEURAL NETWORK IN THE TASK OF DETECTING STOMACH PATHOLOGIES ON VIDEO IMAGES OF ENDOSCOPIC EXAMINATION	185
<i>Kuznetsova O.Yu., Kuznetsov R.N., Kuzmin A.V.</i> IMPLEMENTATION OF ENSEMBLE MACHINE LEARNING MODEL FOR POSTOPERATION COMPLICATIONS PREDICTION ...	193

Раздел 1

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Section 1

MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 339.5
doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-1

ЦИФРОВЫЕ ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРМАТ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ УСЛУГ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Ю. Б. Егерев¹, В. В. Бахарев²

^{1, 2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

¹ julia.eg@yandex.ru, ² baharev_vv@spbtu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе поднимается проблема отсутствия общепринятого полного определения цифровой платформы, несмотря на повсеместное использование термина. *Материалы и методы.* Для изучения существующих подходов к определению цифровой платформы использован метод несистематизированного обзора литературы по тематике цифровых платформ (на примере цифровых логистических платформ). *Результаты.* На основе изученных источников представлен критический анализ существующих подходов к определению цифровых логистических платформ. Выделены характерные черты, присущие цифровым платформам, определены пробелы, существующие в научной литературе, при описании цифровых платформ, систематизированы способы классификации цифровых платформ. *Выводы.* На основании приведенного анализа представлено авторское определение цифровой логистической платформы, охватывающее основные характеристики цифровых логистических платформ. В соответствии с этим определением цифровая логистическая платформа может быть описана как многопользовательский цифровой сервис, формирующий из набора функциональных модулей инфраструктуру для взаимовыгодного взаимодействия нескольких сторон пользователей (производителей, покупателей, перевозчиков, государства), совместно создающих ценность услуги, оптимизирующий взаимодействие участников посредством использования цифровых алгоритмов, с целью повышения качества клиентского сервиса, сокращения транзакционных издержек и роста эффективности работы логистической системы.

Ключевые слова: цифровые логистические платформы, логистические услуги, цифровой сервис, цифровая инфраструктура, цифровая трансформация

Для цитирования: Егерев Ю. Б., Бахарев В. В. Цифровые логистические платформы как инновационный формат предоставления логистических услуг: критический анализ // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 5–24. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-1

© Егерев Ю. Б., Бахарев В. В., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

DIGITAL LOGISTICS PLATFORMS AS AN INNOVATIVE FORMAT FOR PROVIDING LOGISTICS SERVICES: A CRITICAL ANALYSIS

Yu.B. Egereva¹, V.V. Baharev²

^{1,2} Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹julia.eg@yandex.ru, ²baharev_vv@spbtu.ru

Abstract. *Background.* The paper raises the problem of the lack of a generally accepted full definition of a digital platform, despite the widespread use of the term. *Materials and methods.* To study the existing approaches to the definition of a digital platform, the method of a systematic review of the literature on the subject of digital platforms (using the example of digital logistics platforms) was used. *Results.* Based on the studied sources, a critical analysis of existing approaches to the definition of digital logistics platforms is presented. The characteristic features inherent in digital platforms are highlighted, gaps existing in the scientific literature in the description of digital platforms are identified, ways of classifying digital platforms are systematized. *Conclusions.* Based on the above analysis, the author's definition of a digital logistics platform is presented, covering the main characteristics of digital logistics platforms. According to this definition a digital logistics platform can be described as a multi-user digital service that creates, on the basis of functional modules, an infrastructure for mutually efficient interactions of users belonging to different sides (producers, buyers, transport companies, state) which co-create value of the service. This digital service optimizes interactions on the basis of digital algorithms in order to improve the quality of customer service, to reduce transaction cost and to increase the efficiency of logistics service.

Keywords: digital logistics platforms, logistics services, digital service, digital infrastructure, digital transformation

For citation: Egereva Yu.B., Baharev V.V. Digital logistics platforms as an innovative format for providing logistics services: a critical analysis. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):5–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-1

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется цифровой трансформации существующих моделей ведения бизнеса [1–7]. Одним из способов цифровой трансформации является внедрение и использование цифровой платформы для повышения эффективности взаимодействия участников хозяйственной деятельности [8–11]. Цифровые платформы сегодня используются в различных областях жизни, например при оказании социальных услуг [8], в логистике [12, 13], ритейле [14–17].

Однако для эффективного проведения предприятиями цифровой трансформации и использования ими услуг сторонних платформенных организаций необходимо четкое понимание сущности и особенностей функционирования платформ [15]. Интересно отметить, что в настоящее время, несмотря на повсеместное использование термина «платформа» в научной и практической литературе, единого понимания этого термина пока не сложилось и он используется для описания различных моделей организации хозяйственной деятельности. По этой причине необходимо выполнить анализ существующих подходов к пониманию сущности понятия «платформа». Именно эта задача (на примере логистических платформ) будет решаться в предлагаемом исследовании.

Отметим, что цифровые логистические платформы, по сравнению с более традиционными моделями деятельности логистических компаний, представляют собой инновационный формат предоставления логистических услуг. Эта инновационность обусловлена следующими факторами:

- организация взаимодействий участников рынка логистических услуг происходит в цифровом формате, что значительно ускоряет выполнение процессов оказания услуги, повышает их прозрачность и упрощает координацию;
- платформа, в отличие от традиционной модели организации хозяйственной деятельности в рамках централизованной фирмы (использующей преимущественно собственные ресурсы), активно опирается на ресурсы сторонних организаций (более того, в ряде случаев сама платформа может не заниматься непосредственно предоставлением логистических услуг, лишь обеспечивая координацию взаимодействий между заказчиками и провайдерами данных услуг) [18]. Это значительно расширяет выбор вариантов логистических услуг, доступных для потребителей, и удешевляет стоимость данных услуг.

Таким образом, появление и быстрый рост цифровых логистических платформ представляет собой проявление цифровой трансформации рынка логистических услуг.

Инновационный характер платформ как игроков рынка логистических услуг является дополнительным подтверждением необходимости анализа их природы как формы организации хозяйственной деятельности, поскольку, в силу новизны данной модели предоставления логистических услуг, единая терминология пока отсутствует.

Кроме того, логистические платформы стали крупными участниками рынка соответствующих услуг, а логистика как вид экономической деятельности играет ключевую роль в обеспечении связности мировой и национальной экономики [19]. В связи с этим понимание их природы важно не только с теоретической, но и с практической точки зрения, поскольку без этого, в частности, невозможно эффективное законодательное регулирование их деятельности.

Цель статьи: критический анализ современного состояния научных исследований по теме организационно-экономической природы цифровых логистических платформ и обобщение существующих подходов в данной области.

Материалы и методы

Информационная база исследования сформирована на основе статей по тематике цифровых логистических платформ, представленных в наукометрической базе Scopus (Scopus.com) для работ на английском языке, а также из статей в журналах, включенных в ядро РИНЦ (поиск велся по базе Elibrary.ru), для работ на русском языке. Поиск статей велся по ключевым словам «цифровая логистическая платформа» и «цифровые платформы в логистике» на русском языке и digital logistics platform и digital platform in logistics – на английском языке. Статьи отбирались по их релевантности для целей исследования (которая определялась путем прочтения аннотаций на первом этапе отбора, а также путем прочтения результатов исследования – на втором этапе отбора). Кроме того, были включены дополнительные статьи из других русскоязычных и англоязычных журналов, соответствующие по тематике. В рамках исследования

мы опирались на общенаучный метод анализа и синтеза. Для представления и структурирования информации использовались табличные методы.

Наше исследование включает в себя три последовательных этапа:

1. Изучение цифровых платформ: рассмотрение существующих подходов к их описанию, выделение основных особенностей этих подходов, выделение основных признаков, присущих цифровым платформам. Этот анализ позволит выявить специфику цифровых платформ как технологических, экономических и организационных систем.

2. Описание цифровых логистических платформ с применением полученных на первом этапе результатов. Иными словами, будет рассмотрена специфика функционирования цифровых платформ в сфере логистики.

3. Разработка общего определения цифровых логистических платформ, охватывающего ключевые аспекты их деятельности, на основе синтеза основных подходов к пониманию природы платформ и учета особенностей функционирования цифровых логистических платформ.

Результаты

Анализ литературы по проблематике цифровых логистических платформ позволил установить наличие следующих пробелов:

- отсутствие общепринятого полного определения [20, 21];
- отсутствие перечня критериев, необходимых для отнесения сервиса к цифровой платформе [22];
- отсутствие методики для успешного внедрения платформенной модели, поскольку в источниках указывается, что средний срок жизни цифровой платформы 2–3 года (из-за вытеснения с рынка лидирующей платформой), а также по причине монополизации рынка лидирующей платформой [9, 15, 22];
- отсутствие количественных способов оценки эффективности использования цифровой платформы [15];
- выделение в российских источниках цифровых логистических платформ как платформ транспортной логистики, обособление от торговых цифровых платформ, которые тоже выполняют логистические функции [23–25]. Как уже было сказано выше, в данной работе мы сосредоточимся на первой проблеме, а именно на изучении существующих подходов к пониманию сущности цифровых платформ.

В работе [26] при анализе цифровых логистических систем направления использования цифровых технологий рассматриваются с точки зрения функциональных областей логистики: закупочной, производственной, распределительной, транспортной и информационной.

Такой подход важно использовать и при рассмотрении цифровых логистических платформ (в дальнейшем будет использована аббревиатура ЦЛП), не ограничиваясь восприятием цифровой логистической платформы как платформы, используемой только для транспортной логистики. Кроме того, при таком подходе цифровые платформы ритейла и маркетплейсов, т.е. торговые цифровые платформы [27], можно отнести к цифровым логистическим платформам, задействованным в транспортной, распределительной логистике. В связи с этим при рассмотрении цифровых логистических платформ мы не будем ограничиваться изучением только транспортных цифровых платформ, а будем анализировать применение платформ во всех сферах логистики.

В зарубежных источниках встречаются следующие определения цифровых платформ:

1. Цифровая платформа – внешняя программная система, объединяющая несколько различных функциональных модулей, взаимодействие между которыми возможно посредством интерфейса [28].

2. Цифровые платформы являются технологическими посредниками, позволяющими компаниям пересекать территориальные границы и сотрудничать с международными игроками для создания соответствующих бизнес-сетей [29].

3. Цифровая платформа – это сеть участников, взаимодействие которых обеспечивается и регулируется посредством специального набора компонент (аппаратных, программных и сервисных модулей) [30].

Анализ этих определений позволяет сделать вывод о том, что авторы обращают внимание на разные аспекты функционирования платформы:

1. Цифровая платформа представляет собой цифровую инфраструктуру, созданную для организации взаимодействия участников хозяйственной деятельности. В отдельных источниках наряду с цифровой инфраструктурой в качестве важного элемента платформ указывается организационная инфраструктура (под которой можно понимать правила взаимодействия участников платформы) [11]. Такой подход можно назвать инфраструктурным. Хотя предполагается, что платформа обеспечивает взаимодействие экономических агентов, основное внимание в рамках такого подхода уделяется цифровой инфраструктуре, созданной для этого взаимодействия. Такой подход представлен в работе [31].

2. Цифровые платформы служат для создания взаимосвязей между участниками экономической деятельности без ограничений на их географическое расположение. Эта задача решается благодаря тому, что платформы обеспечивают глобальный охват рынка и способствуют снижению транзакционных издержек взаимодействия. Такой подход можно назвать агрегаторным, поскольку платформы используются в качестве базы для формирования кооперационных связей и партнерств [29].

3. Цифровая платформа представляет собой систему взаимодействующих участников, совместно создающих ценность. Этот подход может быть назван экосистемным. Его отличие от агрегаторного заключается в том, что в рамках агрегаторного подхода на платформе создаются отдельные объединения участников хозяйственной деятельности, тогда как при экосистемном подходе все участники платформы рассматриваются как элементы единой сети создания ценности.

Подходы к определению сущности цифровых платформ, представленные в российских источниках, в целом соответствуют определениям, которые нами были выявлены в иностранной литературе. В частности, в статье [24] предложено следующее определение: «Цифровые платформы представляют собой набор элементов, представляющих механизмы приема данных, машинного обучения, искусственного интеллекта, инструментов API, а также программного обеспечения для мониторинга соответствия нормативным требованиям». Это определение носит технический характер и в целом соответствует инфраструктурному подходу.

Агрегаторный подход часто описывается при рассмотрении цифровых логистических платформ, используемых в области транспортной логистики

и выступающих в качестве замены экспедитора, обеспечивая взаимодействие продавцов и перевозчиков напрямую, исключая привлечение третьей стороны.

В источниках [32, 33] авторами используется агрегаторный подход при рассмотрении автомобильных перевозок. Ключевыми факторами, мотивирующими перевозчиков использовать цифровые платформы и напрямую работать с грузоотправителями, являются высокая фрагментация рынка при низкой прозрачности спроса, недоиспользованность мощностей перевозчиков, высокая доля ручных процессов в операциях документооборота, низкая маржинальная прибыль [32, 33].

Такая же позиция отражается и в работах [34, 35], посвященных рынку морских и авиаперевозок. В данных статьях приводятся другие факторы, способствующие использованию цифровых логистических платформ: длительное согласование и бронирование перевозки, трудности в отслеживании клиентами доставки в режиме реального времени, высокая доля ручных процессов. При использовании цифровых платформ, по сути отражающих эффект «убебризации» [36], т.е. взаимодействию грузоперевозчиков и клиентов напрямую, появляется возможность для клиента прозрачно отслеживать всю цепочку поставки, увеличение скорости бронирования ставки и согласования ставки.

В статье [37] отмечается, что использование цифровых платформ позволяет усовершенствовать несколько процессов, сопровождающих осуществление грузоперевозки:

- документооборот: переход к электронному документообороту, стандартизация документов, автоматизация их формирования;
- проверка грузоперевозчика: выставление требований к перевозчикам и фильтрация кандидатов на платформе, что приводит к сокращению рисков;
- нагрузка на персонал: снижается нагрузка на оперативных сотрудников, согласовывающих ставку, ведущих переговоры и осуществляющих документооборот.

Еще один подход, который можно выделить при описании цифровых платформ, – интегрированный, который соединяет в себе черты нескольких подходов: агрегаторного, информационного и инфраструктурного. Отражение такого подхода встречается в статьях [12, 14, 38], он выражается в «соединении» двух сторон для совершения сделки с помощью созданной технической для этого базы. Аналогично, в статье [23] цифровые логистические платформы определяются как «специально разработанный программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий многостороннее цифровое взаимодействие пользователей в процессе создания и развития цепочек создания стоимости». Легко убедиться в том, что это определение соответствует сочетанию инфраструктурного и агрегаторного подходов.

Критический анализ рассмотренных подходов к описанию цифровых платформ представлен в табл. 1.

Как показывает табл. 1, ни один из существующих подходов не дает полного описания сущности платформ. По этой причине подходы необходимо использовать в комплексе.

Выделим важные характеристики, присущие цифровым платформам:

- наличие цифровой инфраструктуры: использование цифровых технологий присуще платформам как новой модели организации хозяйственной деятельности в условиях цифрового технологического уклада;

– направленность на создание ценности для участников: при взаимодействии участников на платформе происходит совместное создание ценности за счет снижения транзакционных издержек и повышения эффективности сотрудничества;

– многосторонность: участие нескольких сторон участников на платформе (покупатели, производители, посредники, перевозчики).

Таблица 1

Описание подходов к рассмотрению цифровых платформ

Описание подхода	Авторы, которые его разделяют	Основное содержание	Критическая оценка
1	2	3	4
Агрегаторный	В. Д. Маркова [30]; Дж. Ридль [32, 34]; Е. Анисина [37]; Д. Шри и др. [39]; Дж. Дэн и др. [40]	Цифровая платформа – интернет-агрегатор, объединяющий продавцов и покупателей для их взаимодействия и совершения сделок. Описывает ценность, которая создается платформой для ее пользователей (простота использования, бесшовная интеграция и упрощение транзакций). Наиболее применим в транспортной логистике	Достоинства: – подчеркивается взаимодействие различных сторон и цель их сотрудничества (совершение сделки). Недостатки: – недостаточное описание функционала платформы
Инфраструктурный	Е. В. Корчагина [23]; Э. Арриго [41]	Цифровая платформа – комплекс взаимосвязанных структур (операционных, управленческих), составляющих базу для взаимодействия экономической системы	Достоинства: – рассмотрение различных функциональных структур как единой экономической системы. Недостатки: – отсутствие взаимодействия на платформе; – отсутствие описания ценности, которую платформа создает для своих пользователей

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Экосистемный	А. Аддо [8]; Е. В. Устюжанина [15]; А. Хассель и др. [20]; А. Марруччи и др. [29]; М. Де Реувер и др. [31]; Е. В. Корчагина [42]; В. Элоранта и др. [43]; В. ван дер Алст и др. [44]; Л. А. Раменская [45]; Е. Н. Смирнов [46]; О. Н. Антипина [47]; А. И. Коваленко [48]; Х. Хокканен и др. [49]; С. Е. Барыкин и др. [50]; Т. Гаропенко и др. [51]; С. Д. Суворова [52]	Цифровая платформа – экосистема, включающая набор модулей разных функциональных назначений, объединяющая несколько групп пользователей (продавцы, покупатели, посредники), взаимодействующих между собой. Предполагает совместное создание ценности, а также кастомизацию услуги, снижение транзакционных издержек, для масштабирования использования и увеличения эффективности использования необходим сетевой эффект	Достоинства: – взаимосвязь технических параметров и организационных процессов; – описывает сущность платформы как новой модели организации бизнеса; – определена цель использования; – отражает способ создания ценности. Недостатки: – недостаточное внимание технологической составляющей платформ
Интегрированный	Л. Чжэнь и др. [12]; Т. Чой [14]; Д. И. Кочнева [38]	Цифровая платформа – сервис алгоритмизированного принятия решений, направленный на выбор оптимального варианта организации взаимодействия участников хозяйственной деятельности в целях снижения издержек и увеличения дохода	Достоинства: – определена цель использования цифровой платформы; – интегрирует технологическую и организационную составляющую деятельности платформ. Недостатки: – направлена в основном на использование в логистике; – не отражена возможность использования несколькими сторонами

Обобщая изученные источники, можно также выделить следующие черты, присущие цифровым платформам [23–25, 30, 46]:

1. Использование методов машинного обучения для обработки больших объемов данных.
2. Использование алгоритмов для координации деятельности участников.
3. Необходимость обеспечения безопасности сбора и хранения данных.
4. Успешность платформы зависит от количества пользователей, т.е. важен сетевой эффект.
5. Обеспечение обмена информацией между участниками.
6. Поддержка взаимодействия участников, включая проведение платежей между контрагентами.
7. Возможность сокращения издержек.

Ввиду разнообразия цифровых платформ и различных подходов их разработки классификация платформ может производиться по разным принципам. Например, по отраслям использования, масштабам охвата платформой пользователей, открытости платформы, количеству сторон, использующих платформы.

Классификация цифровых логистических платформ по масштабам охвата платформой пользователей отражается в работах [23, 25, 42, 53].

В статьях [23] и [43] цифровые логистические платформы подразделяются на корпоративные и национальные в зависимости от охвата пользователей и уровня использования цифровой логистической платформы.

В статье [42] отмечается, что целью корпоративной платформы является создание большей ценности для клиентов, расширение услуг и улучшение качества их оказания.

Корпоративные платформы делятся на публичные и непубличные. Непубличные платформы предназначены для обслуживания внутренних потребностей компании (и, возможно, ее ключевых партнеров). Публичные платформы носят открытый характер и направлены на обслуживание неограниченного круга потребителей [25]. Однако их деятельность ведется под корпоративным брендом и ориентирована на удовлетворение потребностей компании-оператора и создание ценности в ее интересах.

Под национальными цифровыми логистическими платформами понимаются платформы, создаваемые при поддержке государства и направленные на обеспечение развития национальной экономики за счет оптимизации взаимодействий между участниками хозяйственной деятельности [42].

В работах [23, 42] помимо корпоративных и национальных цифровых платформ также выделяются международные (в работе [27] для обозначения таких платформ используется термин «международные»). Они тоже создаются при поддержке государства и, как правило, предназначены для создания единого международного логистического пространства. При этом для таких платформ характерна определенная асимметрия, поскольку они создаются одним государством, а не всеми теми государствами, которые они охватывают. За счет этого такие платформы могут рассматриваться в качестве инструмента экономического влияния. Это показывает, что в условиях современной экономики, основанной на международных цепочках создания ценности, логистика играет большую роль, и контроль над логистическими платформами, обеспечивающими взаимодействие между участниками цепочек создания ценности,

позволяет операторам таких платформ не только получать доход, но и способствовать укреплению своего экономического и политического влияния.

При таком подходе к классификации ЦЛП в качестве примера корпоративных ЦЛП приводятся AlibabaLogistics, DHL, в качестве национальных ЦЛП – ChuanhuaHighway, Пекинская логистическая платформа, а к международным (межнациональным) относятся Logink, ELP, IThinklogistics [25, 54]. Возможно, в России функции национальной цифровой логистической платформы будет выполнять проектируемая Цифровая платформа транспортного комплекса Российской Федерации [53, 55].

Однако в статьях [23, 25, 53] при анализе цифровых платформ, выделении преимуществ и недостатков национальные и международные (межнациональные) цифровые платформы объединяются в одну группу. Это связано с тем, что, наряду с достижением собственных экономических целей, они призваны способствовать развитию национальной экономики и международного сотрудничества.

Отметим, что подход к классификации цифровых логистических платформ по принципу масштаба охвата платформой пользователей может быть применим не только к логистическим цифровым платформам, но и к торговым цифровым платформам.

Как показывает выполненный нами анализ, разделение платформ на корпоративные, национальные и международные описывает не только их охват пользователей, но и цели деятельности данных платформ. Корпоративные платформы направлены на максимизацию прибыли оператора, тогда как национальные и международные создают условия для экономического развития. Это позволяет разделить логистические платформы с точки зрения их целей на коммерческие (корпоративные) и комплексные (т.е. направленные на комплексные цели) платформы (к комплексным платформам относятся национальные и международные).

Как уже было сказано выше, классификация цифровых платформ может быть построена по принципу открытости, представленному в источнике [25]. При данном подходе цифровые платформы подразделяются на непубличные и публичные в зависимости от их открытости для сторонних пользователей [25]. В существующих источниках такое разделение представлено только для корпоративных платформ [25], однако мы считаем целесообразным распространить его и на национальные и международные платформы.

Международные цифровые платформы являются публичными, так как рассчитаны на использование широким кругом участников экономической деятельности [25].

В работе [24] приводится типизация цифровых логистических платформ с точки зрения совокупности нескольких характеристик: предметный состав, функциональная специализация, методы обработки информации и результат деятельности. В результате представлены три типа цифровых платформ: инструментальные, инфраструктурные, прикладные.

Инструментальные цифровые системы характеризуются как программные системы, предназначенные для создания прикладных программных продуктов для решения задач в области транспортной логистики [24]. Инфраструктурные цифровые платформы являются экосистемами, автоматизирующими предоставление услуг посредством использования новых цифровых

технологий [24]. Прикладные цифровые платформы рассчитаны на обмен информацией в единой цифровой информационной среде [24].

Таким образом, типизация, указанная авторами в работе [37], представляет собой три подхода к описанию цифровых платформ, находящих частичное отражение в табл. 1: агрегаторный, инфраструктурный и экосистемный. Это означает, что классификация подходов, представленная в табл. 1, не только отражает классификацию подходов к определению цифровых платформ, но и может быть использована как классификация самих цифровых платформ.

Обобщая подходы к классификации цифровых логистических платформ, составим табл. 2.

Таблица 2

Подходы к классификации цифровых
логистических платформ [23, 25, 37, 42, 52]

Принцип классификации	Типы	Описание типа, отличительные особенности
Масштаб охвата пользователей	Корпоративные	Создаются компанией для собственных целей (либо обслуживания собственных потребностей, либо предоставления услуг своим потребителям). Носят коммерческий характер
	Национальные	Создаются государственными органами или крупными предприятиями (при государственной поддержке), используются значительным количеством участников на территории одной страны, направлены на развитие национальной экономики
	Международные (межнациональные)	Создаются государством или международным союзом с целью создания единого логистического пространства
Открытость платформы	Непубличные	Создаются частным предприятием для внутреннего использования, доступ на платформу ограничен разработчиком
	Публичные	Создаются для использования большим числом участников
Предметный состав, функциональная специализация, методы обработки информации	Инструментальные	Создаются для алгоритмизации принятия решения в транспортной логистике
	Инфраструктурные	Формируют экосистему для взаимодействия нескольких сторон участников
	Прикладные	Создаются для обмена информацией в цифровой среде

В различных источниках при анализе использования цифровых платформ и проведении их сравнительного анализа, помимо признаков классификации, представленных в табл. 2, рассматриваются также такие характеристики, как размер платформы (количество пользователей и партнеров), функционал, дизайн и интерфейс, рейтинг среди пользователей [23, 38, 42, 53].

Рассмотрев ряд источников, можно утверждать, что наиболее полным и отражающим цифровую трансформацию, заключающуюся в реорганизации

традиционной бизнес-модели с помощью цифровых инструментов для создания дополнительной ценности, является экосистемный подход, подразумевающий создание экосистемы бизнеса с помощью внедрения и использования цифровой платформы.

При таком рассмотрении цифровой логистической платформы можно выдвинуть следующее определение: цифровая логистическая платформа – многопользовательский цифровой сервис, формирующий из набора функциональных модулей инфраструктуру для взаимовыгодного взаимодействия нескольких сторон пользователей (производителей, покупателей, перевозчиков, государства), совместно создающих ценность услуги, оптимизирующий взаимодействие участников посредством использования цифровых алгоритмов с целью повышения качества клиентского сервиса, сокращения транзакционных издержек и роста эффективности работы логистической системы.

Предлагаемое нами определение обобщает основные выделенные подходы к пониманию технологической, организационной и экономической природы цифровых логистических платформ и позволяет представить целостную картину содержания их деятельности.

Выводы

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основании изученных источников выделены подходы к описанию цифровых платформ: агрегаторный, инфраструктурный, экосистемный и интегрированный. Критерием для выделения стали те аспекты деятельности платформ, которые используются в соответствующих подходах.

2. Выделены общие для всех подходов характеристики цифровых платформ: использование методов машинного обучения и алгоритмов, необходимость обеспечения безопасности получаемых данных, зависимость эффективности от сетевого эффекта, сокращение издержек, многосторонность и совместное создание ценности.

3. Определены пробелы, не рассматриваемые в существующих научных источниках: отсутствие общепринятого научного определения, отсутствие перечня критериев, необходимых для отнесения сервиса к цифровой платформе, отсутствие описания модели для успешного внедрения платформенной модели, отсутствие количественных способов оценки эффективности использования цифровой платформы.

4. Предложено авторское определение цифровой логистической платформы: цифровая логистическая платформа – многопользовательский цифровой сервис, формирующий из набора функциональных модулей инфраструктуру для взаимовыгодного взаимодействия нескольких сторон пользователей (производителей, покупателей, перевозчиков, государства), совместно создающих ценность услуги, оптимизирующий взаимодействие участников посредством использования цифровых алгоритмов с целью повышения качества клиентского сервиса, сокращения транзакционных издержек и роста эффективности работы логистической системы.

Полученные нами результаты могут быть использованы в качестве основы для следующих перспективных направлений исследований:

– разработка теоретического инструментария и формирование практических стратегий повышения эффективности деятельности цифровых логистических платформ с учетом их технологической, экономической и организационной природы;

– разработка нормативно-правовой базы для регулирования деятельности цифровых логистических платформ, а также взаимодействий участников платформ.

Список литературы

1. Апатова Н. В. Управление процессами цифровой трансформации бизнеса // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление. 2022. Т. 8, № 2. С. 3–8. EDN: SCWJEG
2. Апатова Н. В. Цифровые трансформации бизнеса и социума // Вестник Тверского государственного университета. Сер.: Экономика и управление. 2022. № 4. С. 60–71. doi: 10.26456/2219-1453/2022.4.060-071 EDN: ZWZQWV
3. Десфонтейнес Л. Г., Семенова Ю. Е. Цифровая трансформация бизнеса в период экономической турбулентности // Интеграция науки и производства. 2019. № 6. С. 33–37. EDN: FCEDAI
4. Довганева Ю. А., Алексеева Е. А. Переход малого бизнеса к цифровизации в условиях пандемии // Управление развитием экономических систем (г. Санкт-Петербург, 21–22 декабря 2021 г.). СПб. : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. С. 42–48. EDN: KJLRVI
5. Котляров И. Д. Цифровая трансформация финансовой сферы: содержание и тенденции // Управление. 2020. Т. 11, № 3. С. 72–81. doi: 10.29141/2218-5003-2020-11-3-6 EDN: QCAMVP
6. Плотников В. А. Цифровизация как закономерный этап эволюции экономической системы // Экономическое возрождение России. 2020. № 2. С. 104–115. doi: 10.37930/1990-9780-2020-2-64-104-115 EDN: AUTMFU
7. Суворова С. Д., Куликова О. М. Цифровая трансформация бизнеса // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2022. № 2. С. 54–59. doi: 10.47581/2022/IE.2.60.10 EDN: OVPLOP
8. Addo A. Orchestrating a digital platform ecosystem to address societal challenges: A robust action perspective // Journal of Information Technology. 2022. Vol. 37, № 4. doi: 10.1177/02683962221088333
9. Barykin S. E., Kapustina I. V., Sergeev S. M. [et al.] Sustainability of management decisions in a digital logistics network // Sustainability. 2021. Vol. 13, № 16. doi: 10.3390/su13169289 EDN: ZXGMEE
10. Шаститко А. Е., Маркова О. А. Эффекты становления и функционирования многосторонних рынков: подходы к исследованию // Общественные науки и современность. 2019. № 3. С. 52–65. doi: 10.31857/S086904990005085-5 EDN: ZKEVUL
11. Котляров И. Д. Платформы как модель организации хозяйственной деятельности: отдельные особенности функционирования // Экономика и управление: теория и практика. 2022. Т. 8, № 2. С. 30–37. EDN: KIXFCK
12. Zhen L., Baldacci R., Tan Z. [et al.]. Scheduling heterogeneous delivery tasks on a mixed logistics platform // European Journal of Operational Research. 2022. Vol. 298, № 2. doi: 10.1016/j.ejor.2021.06.057
13. Kharlamova T., Desfontaines L., Barykin S. E. [et al.]. Prospects for the development of transport infrastructure to ensure sustainable development // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63, № 11. doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.075
14. Choi T. Internet based elastic logistics platforms for fashion quick response systems in the digital era // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. Vol. 143. doi: 10.1016/j.tre.2020.102096

15. Устюжанина Е. В., Дементьев В. Е., Евсюков С. Г. Трансакционные цифровые платформы: задача обеспечения эффективности // Экономика и математические методы. 2021. Т. 57, № 1. С. 5–18. doi: 10.31857/S042473880013023-4 EDN: WAXXJC
16. Бахарев В. В., Митяшин Г. Ю. Тенденции развития ритейла в России // Экономический вектор. 2020. № 3. С. 54–60. doi: 10.36807/2411-7269-2020-3-22-54-60
17. Митяшин Г. Ю. Варианты организации доставки из малых торговых предприятий // 71-я Международная студенческая научно-техническая конференция : материалы конференции. Астрахань : Астраханский государственный технический университет, 2021. С. 1063–1064.
18. Толстых Т. О., Агаева А. М. Экосистемная модель развития предприятий в условиях цифровизации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 1. С. 37–49. doi: 10.21685/2227-8486-2020-1-3
19. Балахонова Е. В., Мещерякова О. В., Сүй Д. Х. К вопросу о роли экспортных и экспортно-импортных хабов в развитии межгосударственных торговых отношений и транспортно-логистических связей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 3. С. 5–24. doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-1
20. Hassel A., Sieker F. The platform effect: How Amazon changed work in logistics in Germany, the United States and the United Kingdom // European Journal of Industrial Relations. 2022. Vol. 28, № 3. doi: 10.1177/09596801221082456
21. Ratten V. Digital platforms and transformational entrepreneurship during the COVID-19 crisis // International Journal of Information Management. 2022. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2022.102534
22. Barenji A. V., Montreuil B. Open Logistics: Blockchain-Enabled Trusted Hyperconnected Logistics Platform // Industry 4.0 Supply Chain: From Connectivity Provisioning, Data Management to Cyber Resilience. 2022. Vol. 22, № 13. doi: 10.3390/s22134699
23. Корчагина Е. В., Еремин К. А., Видинеева Е. В. Цифровые логистические платформы: анализ зарубежного опыта // Журнал правовых и экономических исследований. 2021. № 4. С. 27–31. doi: 10.26163/GIEF.2021.42.11.004 EDN: TEKSQJ
24. Суворова С. Д., Бойко И. А., Захаренко А. И. Проектирование цифровых логистических платформ в цепи поставок // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 29. С. 321–325. doi: 10.24411/2309-4788-2020-10281 EDN: QTFMTN
25. Корчагина Е. В. Цифровые логистические платформы: подходы к классификации // Журнал правовых и экономических исследований. 2022. № 2. С. 13–17. doi: 10.26163/GIEF.2022.85.79.002 EDN: SCXIJ
26. Бекмурзаев И. Д., Курбанов А. Х., Курбанов Т. Х. Направления и этапы построения логистических систем на основе использования цифровых технологий // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2018. № 4. С. 5–9. doi: 10.24151/2409-1073-2018-4-5-9 EDN: YRMKKT
27. Зубаков Г. В., Проценко О. Д. Цифровая платформа транспортного комплекса Российской Федерации. Некоторые аспекты реализации // Креативная экономика. 2019. Т. 13, № 3. С. 407–420. doi: 10.18334/ce.13.3.40461 EDN: DVOKNI
28. Ghazawneh A., Henfridsson O. A paradigmatic analysis of digital application marketplaces // Journal of Information Technology. 2015. Vol. 30, № 3. doi: 10.1057/jit.2015.16
29. Marrucci A., Rialti R., Donvito R. [et al.]. "Connected we stand, disconnected we fall". Analyzing the importance of digital platforms in transnational supply chain management // International Journal of Emerging Markets. 2022. doi: 10.1108/IJOEM-01-2022-0073
30. Маркова В. Д. Платформенные модели бизнеса: подходы к созданию // ЭКО. 2019. № 5. С. 106–123. EDN: YPFDAM.
31. Reuver M. De, Sørensen C., Basole R. C. The digital platform: a research agenda // Journal of Information Technology. 2018. Vol. 33, № 2. doi: 10.1057/s41265-016-0033-3

32. Riedl J., Jentzsch A., Melcher N. C. [et al.]. Why Road Freight Needs to Go Digital–Fast // The Boston Consulting Group. 2018. URL: <https://www.bcg.com/publications/2018/why-road-freight-needs-go-digital-fast> (дата обращения: 13.01.2023).
33. Janakiraman V., Parekh A., Verma S. [et al.]. AUTO: BUSINESS PLATFORMS ARE THE FUTURE // The Boston Consulting Group. 2020. URL: <https://web-assets.bcg.com/ba/68/0ae0b21e49d9a0f2118ff9f8c265/auto-business-platforms-are-the-future.pdf> (дата обращения: 13.01.2023).
34. Chan T., Schöndorfer S., Schröder F. [et al.]. The Digital Imperative in Freight Forwarding // The Boston Consulting Group. 2018. URL: <https://www.bcg.com/publications/2018/digital-imperative-freight-forwarding> (дата обращения: 13.01.2023).
35. Farag H., Korenkiewicz D., Riedl J. Getting Ahead of the Megatrends in Transportation and Logistics // Transportation and Logistics in a Changing World. 2016. URL: <https://www.bcg.com/publications/2016/corporate-development-finance-value-creation-strategy-getting-ahead-of-the-megatrends-in-transportation-and-logistics> (дата обращения: 13.01.2023).
36. Vignon D., Yin Y., Ke J. Regulating the ride-hailing market in the age of uberization // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2023. Vol. 169. doi: 10.1016/j.tre.2022.102969
37. Анисимова Е. Логистика на платформе // Новая городская экономика. 2019. № 4. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5d7f84c47a8aa95f6d08db44> (дата обращения: 13.01.2023).
38. Кочнева Д. И., Сай В. М. Интегрированное управление контейнерной транспортной системой региона // Экономика региона. 2021. Т. 17, № 4. С. 1270–1285. doi: 10.17059/ekon.reg.2021-4-16 EDN: XCDPHA
39. Shree D., Kumar Singh R., Paul J. [et al.]. Digital platforms for business-to-business markets: A systematic review and future research agenda // Journal of Business Research. 2021. Vol. 137. P. 354–365. doi: 10.1016/j.jbusres.2021.08.031 EDN: WWTYTG
40. Deng J., Chen X., Wei W. [et al.]. Resource coordination scheduling optimisation of logistics information sharing platform considering decision response and competition // Computers & Industrial Engineering. 2022. Vol. 176, № 100. doi: 10.1016/j.cie.2022.108892
41. Arrigo E. Digital platforms in fashion rental: a business model analysis // Journal of Fashion Marketing and Management. 2022. Vol. 26, № 1. doi: 10.1108/JFMM-03-2020-0044
42. Корчагина Е. В., Барыкин С. Е. Развитие цифровых торговых и логистических платформ: анализ опыта Индии // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика : материалы II Нац. науч.-обр. конф. (г. Санкт-Петербург, 21 октября 2021 г.). СПб. : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. С. 133–139. EDN: SLDSIE
43. Eloranta V., Ardolino M., Saccani N. A complexity management approach to servitization: the role of digital platforms // International Journal of Operations & Production Management. 2021. Vol. 41, № 5. doi: 10.1108/IJOPM-08-2020-0582
44. Aalst W. van der, Hinz O., Weinhardt C. Big Digital Platforms: Growth, Impact, and Challenges // Business & Information Systems Engineering. 2019. Vol. 61, № 6. doi: 10.1007/s12599-019-00618-y
45. Раменская Л. А. Взаимодействие цифровых платформ с ключевыми заинтересованными сторонами: контент-анализ // Управленец. 2021. Т. 12, № 5. С. 96–106. doi: 10.29141/2218-5003-2021-12-5-7 EDN: XCHFOL
46. Смирнов Е. Н., Лукьянов С. А. Императивы управления глобальными цифровыми платформами // Управленец. 2020. Т. 11, № 4. С. 59–69. doi: 10.29141/2218-5003-2020-11-4-5 EDN: AUTSAA
47. Антипина О. Н. Платформы как многосторонние рынки эпохи цифровизации // Мировая экономика и международные отношения. 2020. Т. 64, № 3. С. 12–19. doi: 10.20542/0131-2227-2020-64-3-12-19 EDN: XXUZWT

48. Коваленко А. И. Многосторонняя платформа как сеть создания стоимости // Управленец. 2017. № 4. С. 39–42. EDN: ZTWXVJ
49. Hokkanen H., Hänninen M., Yrjölä M. [et al.]. From customer to actor value propositions: an analysis of digital transaction platforms // The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research. 2021. Vol. 31, № 3. doi: 10.1080/09593969.2021.1880463
50. Barykin S. E., Kapustina I. V., Korchagina E. V. [et al.]. Digital logistics platforms in the brics countries: Comparative analysis and development prospects // Sustainability. 2021. Vol. 13, № 20. doi: 10.3390/su132011228 EDN: FCSUKF
51. Gaponenko T., Hvoevskaya L. Digital transport platforms: Reality and prospects // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63, № 1. doi: 0.1016/j.trpro.2022.06.123
52. Куликова О. М., Суворова С. Д. Маркетплейс: бизнес-модель современной торговли // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2020. № 6. С. 50–55. doi: 10.47581/2020/10.23.PS85/IE/5.48.008 EDN: ZLREFV
53. Барыкин С. Е., Егерева Ю. Б., Корчагина Е. В. [и др.]. Крупнейшие международные цифровые логистические платформы: сравнительный анализ // Омский научный вестник. Сер.: Общество. История. Современность. 2022. Т. 7, № 1. С. 97–103. doi: 10.25206/2542-0488-2022-7-1-97-103 EDN: GTYOWI
54. Корчагина Е. В., Барыкин С. Е., Егерева Ю. Б. Повышение качества логистического сервиса: опыт цифровой логистической платформы «Logink» // Актуальные проблемы науки и практики: Гатчинские чтения – 2021 : сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Гатчина, 21–22 мая 2021 г.). Гатчина : Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, 2021. Т. 1. С. 232–234. EDN: TSXXGT
55. Белик В. А., Кудрявцева Т. Ю. Цифровизация транспортной отрасли Российской Федерации: текущее положение, проблемы и тенденции // Бизнес. Образование. Право. 2022. № 4. С. 64–70. doi: 10.25683/VOLBI.2022.61.417 EDN: DCYCFQ

References

1. Apatova N.V. Managing the processes of digital transformation of business. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Ekonomika i upravlenie = Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and management*. 2022;8(2):3–8. (In Russ.)
2. Apatova N.V. Digital transformations of business and society. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of Tver State University. Ser.: Economics and Management*. 2022;(4):60–71. (In Russ.). doi: 10.26456/2219-1453/2022.4.060-071
3. Desfonteynes L.G., Semenova Yu.E. Digital transformation of business in the period of economic turbulence. *Integratsiya nauki i proizvodstva = Integration of science and production*. 2019;(6):33–37. (In Russ.)
4. Dovganeva Yu.A., Alekseeva E.A. The transition of small business to digitalization in a pandemic. *Upravlenie razvitiem ekonomicheskikh sistem (g. Sankt-Peterburg, 21–22 dekabrya 2021 g.) = Management of the development of economic systems (St. Petersburg, December 21–22, 2021)*. Saint Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, 2021. S. 42–48. (In Russ.)
5. Kotlyarov I.D. Digital transformation of the financial sphere: content and trends. *Upravlenets = Manager*. 2020;11(3):72–81. (In Russ.). doi: 10.29141/2218-5003-2020-11-3-6
6. Plotnikov V.A. Digitalization as a natural stage of the evolution of the economic system. *Ekonomicheskoe vrozozhdenie Rossii = The economic revival of Russia*. 2020;(2): 104–115. (In Russ.). doi: 10.37930/1990-9780-2020-2-64-104-115
7. Suvorova S.D., Kulikova O.M. Digital transformation of business. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya = Innovative economy:*

- prospects for development and improvement. 2022;(2):54–59. (In Russ.). doi: 10.47581/2022/IE.2.60.10
8. Addo A. Orchestrating a digital platform ecosystem to address societal challenges: A robust action perspective. *Journal of Information Technology*. 2022;37(4). doi: 10.1177/02683962221088333
9. Barykin S.E., Kapustina I.V., Sergeev S.M. et al. Sustainability of management decisions in a digital logistics network. *Sustainability*. 2021;13(16). doi: 10.3390/su13169289
10. Shastitko A.E., Markova O.A. Effects of the formation and functioning of multilateral markets: approaches to research. *Obshchestvennye nauki i sovremennost' = Social sciences and modernity*. 2019;(3):52–65. (In Russ.). doi: 10.31857/S086904990005085-5
11. Kotlyarov I.D. Platforms as a model of economic activity organization: individual features of functioning. *Ekonomika i upravlenie: teoriya i praktika = Economics and Management: theory and practice*. 2022;8(2):30–37. (In Russ.)
12. Zhen L., Baldacci R., Tan Z. [et al.]. Scheduling heterogeneous delivery tasks on a mixed logistics platform. *European Journal of Operational Research*. 2022;298(2). doi: 10.1016/j.ejor.2021.06.057
13. Kharlamova T., Desfontaines L., Barykin S. E. et al. Prospects for the development of transport infrastructure to ensure sustainable development. *Transportation Research Procedia*. 2022;63(11). doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.075
14. Choi T. Internet based elastic logistics platforms for fashion quick response systems in the digital era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020;143. doi: 10.1016/j.tre.2020.102096
15. Ustyuzhanina E.V., Dement'ev V.E., Evsyukov S.G. Transactional digital platforms: the task of ensuring efficiency. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and mathematical methods*. 2021;57(1):5–18. (In Russ.). doi: 10.31857/S042473880013023-4
16. Bakharev V.V., Mityashin G.Yu. Trends in retail development in Russia. *Ekonomicheskiiy vector = Economic vector*. 2020;(3):54–60. (In Russ.). doi: 10.36807/2411-7269-2020-3-22-54-60
17. Mityashin G.Yu. Options for organizing delivery from small trading enterprises. *71-ya Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: materialy konferentsii = 71st International Student Scientific and Technical Conference : conference materials*. Astrakhan: Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2021:1063–1064. (In Russ.)
18. Tolstykh T.O., Agaeva A.M. Ecosystem model of enterprise development in the context of digitalization. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(1):37–49. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2020-1-3
19. Balakhonova E.V., Meshcheryakova O.V., Syuy D.Kh. On the role of export and export-import hubs in the development of interstate trade relations and transport and logistics links. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(3):5–24. doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-1
20. Hassel A., Sieker F. The platform effect: How Amazon changed work in logistics in Germany, the United States and the United Kingdom. *European Journal of Industrial Relations*. 2022;28(3). doi: 10.1177/09596801221082456
21. Ratten V. Digital platforms and transformational entrepreneurship during the COVID-19 crisis. *International Journal of Information Management*. 2022. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2022.102534
22. Barenji A.V., Montreuil B. Open Logistics: Blockchain-Enabled Trusted Hyperconnected Logistics Platform. *Industry 4.0 Supply Chain: From Connectivity Provisioning, Data Management to Cyber Resilience*. 2022;22(13). doi: 10.3390/s22134699

23. Korchagina E.V., Eremin K.A., Vidineeva E.V. Digital logistics platforms: analysis of foreign experience. *Zhurnal pravovykh i ekonomicheskikh issledovaniy = Journal of Legal and Economic Research*. 2021;(4):27–31. (In Russ.). doi: 10.26163/GIEF.2021.42.11.004
24. Suvorova S.D., Boyko I.A., Zakharenko A.I. Designing digital logistics platforms in the supply chain. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya = Natural Sciences and Humanities Research*. 2020;(29):321–325. (In Russ.). doi: 10.24411/2309-4788-2020-10281
25. Korchagina E.V. Digital logistics platforms: approaches to classification. *Zhurnal pravovykh i ekonomicheskikh issledovaniy = Journal of Legal and Economic Research*. 2022;(2):13–17. (In Russ.). doi: 10.26163/GIEF.2022.85.79.002
26. Bekmurzaev I.D., Kurbanov A.Kh., Kurbanov T.Kh. Directions and stages of building logistics systems based on the use of digital technologies. *Ekonomicheskie i sotsial'no-gumanitarnye issledovaniya = Economic and socio-humanitarian studies*. 2018;(4):5–9. (In Russ.). doi: 10.24151/2409-1073-2018-4-5-9
27. Zubakov G.V., Protsenko O.D. Digital platform of the transport complex of the Russian Federation. Some aspects of implementation. *Kreativnaya ekonomika = Creative Economy*. 2019;13(3):407–420. (In Russ.). doi: 10.18334/ce.13.3.40461
28. Ghazawneh A., Henfridsson O. A paradigmatic analysis of digital application market-places. *Journal of Information Technology*. 2015;30(3). doi: 10.1057/jit.2015.16
29. Marrucci A., Rialti R., Donvito R. [et al.]. "Connected we stand, disconnected we fall". Analyzing the importance of digital platforms in transnational supply chain management. *International Journal of Emerging Markets*. 2022. doi: 10.1108/IJOEM-01-2022-0073
30. Markova V.D. Platform business models: approaches to creation. *EKO = ECO*. 2019;(5):106–123. (In Russ.).
31. Reuver M. De, Sørensen C., Basole R. C. The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*. 2018;33(2). doi: 10.1057/s41265-016-0033-3
32. Riedl J., Jentzsch A., Melcher N.C. et al. Why Road Freight Needs to Go Digital–Fast. *The Boston Consulting Group*. 2018. Available at: <https://www.bcg.com/publications/2018/why-road-freight-needs-go-digital-fast> (accessed 13.01.2023).
33. Janakiraman V., Parekh A., Verma S. et al. AUTO: BUSINESS PLATFORMS ARE THE FUTURE. *The Boston Consulting Group*. 2020. Available at: <https://web-assets.bcg.com/ba/68/0ae0b21e49d9a0f2118ff9f8c265/auto-business-platforms-are-the-future.pdf> (accessed 13.01.2023).
34. Chan T., Schöndorfer S., Schröder F. et al. The Digital Imperative in Freight Forwarding. *The Boston Consulting Group*. 2018. Available at: <https://www.bcg.com/publications/2018/digital-imperative-freight-forwarding> (accessed 13.01.2023).
35. Farag H., Korenkiewicz D., Riedl J. Getting Ahead of the Megatrends in Transportation and Logistics. *Transportation and Logistics in a Changing World*. 2016. Available at: <https://www.bcg.com/publications/2016/corporate-development-finance-value-creation-strategy-getting-ahead-of-the-megatrends-in-transportation-and-logistics> (accessed 13.01.2023).
36. Vignon D., Yin Y., Ke J. Regulating the ride-hailing market in the age of uberization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023;169. doi: 10.1016/j.tre.2022.102969
37. Anisimova E. Logic on the platform. *Novaya gorodskaya ekonomika = New Urban Encyclopedia*. 2019;(4). (In Russ.). Available at: <https://plus.rbc.ru/news/5d7f84c47a8aa95f6d08db44> (accessed 13.01.2023).
38. Kochneva D.I., Say V.M. Integration management of the continental transport system of the region. *Ekonomika regiona = The economy of the region*. 2021;17(4):1270–1285. (In Russ.). doi: 10.17059/ekon.reg.2021-4-16
39. Shree D., Kumar Singh R., Paul J. et al. Digital platforms for business-to-business markets: A systematic review and future research agenda. *Journal of Business Research*. 2021;137:354–365. doi: 10.1016/j.jbusres.2021.08.031

40. Deng J., Chen X., Wei W. et al. Resource coordination scheduling optimisation of logistics information sharing platform considering decision response and competition. *Computers & Industrial Engineering*. 2022;176(100). doi: 10.1016/j.cie.2022.108892
41. Arrigo E. Digital platforms in fashion rental: a business model analysis. *Journal of Fashion Marketing and Management*. 2022;26(1). doi: 10.1108/JFMM-03-2020-0044
42. Korchagina E.V., Barykin S.E. The development of digital trading and logistics platforms: an analysis of the experience of India. *Logistika: foresayt-issledovaniya, professiya, praktika: materialy II Nats. nauch.-obr. konf. (g. Sankt-Peterburg, 21 oktyabrya 2021 g.) = Logistics: foresight research, profession, practice : materials II in the National Scientific Conference (St. Petersburg, 21 October 2021)*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy ekonomicheskii universitet, 2021:133–139. (In Russ.)
43. Eloranta V., Ardolino M., Saccani N. A complexity management approach to servitization: the role of digital platforms. *International Journal of Operations & Production Management*. 2021;41(5). doi: 10.1108/IJOPM-08-2020-0582
44. Aalst W. van der, Hinz O., Weinhardt C. Big Digital Platforms: Growth, Impact, and Challenges. *Business & Information Systems Engineering*. 2019;61(6). doi: 10.1007/s12599-019-00618-y
45. Ramenskaya L.A. Interaction of digital platforms with key stakeholders: content analysis. *Upravlenets = Manager*. 2021;12(5):96–106. (In Russ.). doi: 10.29141/2218-5003-2021-12-5-7
46. Smirnov E.N., Luk'yanov S.A. Imperatives of global finance management. *Upravlenets = Manager*. 2020;11(4):59–69. (In Russ.). doi: 10.29141/2218-5003-2020-11-4-5
47. Antipina O.N. Platforms as multilateral markets of the era of digitalization. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya = World Economy and International Relations*. 2020;64(3):12–19. (In Russ.). doi: 10.20542/0131-2227-2020-64-3-12-19
48. Kovalenko A.I. Multilateral platform as a value creation network. *Upravlenets = Manager*. 2017;(4):39–42. (In Russ.)
49. Hokkanen H., Hänninen M., Yrjölä M. et al. From customer to actor value propositions: an analysis of digital transaction platforms. *The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*. 2021;31(3). doi: 10.1080/09593969.2021.1880463
50. Barykin S.E., Kapustina I.V., Korchagina E.V. et al. Digital logistics platforms in the brics countries: Comparative analysis and development prospects. *Sustainability*. 2021;13(20). doi: 10.3390/su132011228
51. Gaponenko T., Hvoevskaya L. Digital transport platforms: Reality and prospects. *Transportation Research Procedia*. 2022;63(1). doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.123
52. Kulikova O.M., Suvorova S.D. Marketplace: a limited liability business model. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya = Innovative economy: development prospects and government*. 2020;(6):50–55. (In Russ.). doi: 10.47581/2020/10.23.PS85/IE/5.48.008
53. Barykin S.E., Egereva Yu.B., Korchagina E.V. et al. The largest international digital logistics platforms: comparative analysis. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser.: Obshchestvo. Istoriya. Sovremennost' = Omsk Scientific Bulletin. Ser.: Society. History. Modernity*. 2022;7(1):97–103. (In Russ.). doi: 10.25206/2542-0488-2022-7-1-97-103
54. Korchagina E.V., Barykin S.E., Egereva Yu.B. Improving the quality of logistics service: checking the Logink logistics platform. *Aktual'nye problemy nauki i praktiki: Gatchinskie chteniya – 2021: sb. nauch. tr. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Gatchina, 21–22 maya 2021 g.) = Actual problems of science and practice: Gatchina Readings – 2021 : Collection of scientific tr. based on the materials of the VIII International Scientific and Practical Conference (Gatchina, May 21–22, 2021)*. Gatchina: Gosudarstvennyy institut ekonomiki, finansov, prava i tekhnologiy, 2021;1:232–234.
55. Belik V.A., Kudryavtseva T.Yu. Digitalization of the transport industry of the Russian Federation: current situation, problems and trends. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Right*. 2022;(4):64–70. (In Russ.). doi: 10.25683/VOLBI.2022.61.417

Информация об авторах / Information about the authors

Юлия Борисовна Егерова

магистрант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
E-mail: julia.eg@yandex.ru

Yulia B. Egereva

Master degree student,
Peter the Great Saint Petersburg
Polytechnic University
(29 Politechnicheskaya street,
Saint Petersburg, Russia)

Владимир Васильевич Бахарев

кандидат экономических наук, доцент,
доцент Высшей школы сервиса
и торговли,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
E-mail: baharev_vv@spbtu.ru

Vladimir V. Baharev

Candidate of economical sciences,
associate professor, associate professor
of the Higher school of service and trade,
Peter the Great Saint Petersburg
Polytechnic University
(29 Politechnicheskaya street,
Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 13.04.2023

Поступила после рецензирования/Revised 24.05.2023

Принята к публикации/Accepted 28.05.2023

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ТУРИСТСКОГО ПРОДУКТА В РЕГИОНЕ

Л. А. Гамидуллаева¹, А. Г. Финогеев²

^{1, 2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ gamidullaeva@gmail.com, ² alexeyfinogeev@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время синтез моделей и моделирование туристических бизнес-процессов непосредственно определяется развитием ИКТ, которые являются средством связи путешественников во всем мире как между собой, так и с различного рода организационными структурами (турагентствами, навигационными сервисами, финансовыми системами, сервисами поиска и бронирования билетов, гостиниц, трансфера и т.д.). Однако в настоящее время слабо развиты комплексные системы для самостоятельного подбора турпродукта, которые используют технологии искусственного интеллекта для сравнительного анализа туристских продуктов с учетом собственного опыта и опыта других туристов. Актуализируется проблема разработки единой цифровой туристской экосистемы региона с максимально полным доступом к другим системам и базам данных. Это детерминирует необходимость разработки соответствующих методов и подходов с использованием новейших информационных технологий. Цель – разработка методики представления и кластеризации цифровых двойников (аватаров) профилей туристов с нечеткими формулировками предпочтений туристов. *Материалы и методы.* Методическую основу исследования составили общенаучные и специальные методы системного анализа, моделирования, кластеризации, методы синтеза графовых маршрутов, многокритериальной оптимизации и принятия решений, метод бенчмаркинга. *Результаты.* Разработана и представлена оригинальная методика кластеризации предпочтений туристских профилей и туристских продуктов, многокритериальный метод синтеза туристских маршрутов, а также метод сравнительного анализа (бенчмаркинга) туристских продуктов. *Выводы.* Приводится обоснование необходимости интеграции различных подходов и методов для разработки единой цифровой туристской экосистемы в регионе в целях комплексного управления жизненным циклом туристского продукта.

Ключевые слова: цифровая туристская экосистема, туристский продукт, туристский маршрут, распределенный реестр, кластеризация

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-28-20524 «Цифровизация управления жизненным циклом внутреннего регионального туристского продукта на основе технологии блокчейн». (URL: <https://rscf.ru/project/22-28-20524>).

Для цитирования: Гамидуллаева Л. А., Финогеев А. Г. Методы управления жизненным циклом туристского продукта в регионе // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 25–41. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-2

METHODS FOR MANAGING THE LIFE CYCLE OF A TOURIST PRODUCT IN A REGION

L.A. Gamidullaeva¹, A.G. Finogeev²

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

¹ gamidullaeva@gmail.com, ² alexeyfinogeev@gmail.com

Abstract. *Background.* At present, the synthesis of models and modeling of tourism business processes is directly determined by the development of ICT, which are a means of connecting travelers around the world both among themselves and with various organizational structures (travel agencies, navigation services, financial systems, ticket search and booking services, hotels, transfers, etc.). However, at present, integrated systems for self-selection of a tourist product are poorly developed, which use artificial intelligence technologies for a comparative analysis of TP, taking into account their own experience and the experience of other tourists. The problem of developing a unified digital tourism ecosystem of the region with the fullest possible access to other systems and databases is being updated. This determines the need to develop appropriate methods and approaches and use the latest information technologies. The purpose of this article is to develop a methodology for representing and clustering digital twins (avatars) of tourist profiles with fuzzy statements of tourist preferences. *Materials and methods.* The methodological basis of the study was general scientific and special methods of system analysis, modeling, clustering, methods for synthesizing graph routes, multicriteria optimization and decision making, and the benchmarking method. *Results.* The authors have developed and presented an original methodology for clustering the preferences of tourist profiles and tourist products, a multi-criteria method for synthesizing tourist routes, as well as a method for comparative analysis (benchmarking) of tourist products. *Conclusions.* The article provides a justification for the need to integrate various approaches and methods to develop a single digital tourism ecosystem in the region for the integrated management of the life cycle of a tourism product.

Keywords: digital tourism ecosystem, tourism product, tourist route, distributed ledger, clustering

Financing: this research was funded by grant from the Russian Science Foundation (RSF) and Penza Oblast (Russia) (project № 22-28-20524) (URL: <https://rscf.ru/en/project/22-28-20524/> accessed on 14 February 2023).

For citation: Gamidullaeva L.A., Finogeev A.G. Methods for managing the life cycle of a tourist product in a region. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):25–41. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-2

Введение

Особую роль в управлении жизненным циклом туристского продукта (ТП) играют цифровые технологии (ЦТ), использование которых как бизнесом, так и потребителями активизировалось в условиях пандемии COVID-19. Цифровизация вызывает структурные изменения туристского рынка и требует использования новых подходов, технологий и инструментов для управления жизненным циклом туристского продукта [1].

Для планирования и развития туристической отрасли в регионе прежде всего необходима соответствующая инфраструктура в виде информационно-туристических центров, доступных средств и способов передвижения туристов, мест ночевки, объектов общественного питания, объектов продажи

сувенирной продукции, оборудованных мест и способов осмотра достопримечательностей и т.п. Развитие ИКТ сегодня привело к возможности повсеместного внедрения ЦТ для помощи туристам в синтезе, поиске и выборе индивидуальных туристских маршрутов. Однако анализ существующих систем помощи туристам, в том числе и встроенных в известные навигационные сервисы, показал, что несмотря на наличие достаточно развитой инфраструктуры и соответствующего программного обеспечения для доступа к сервисам, в настоящее время слабо развиты комплексные системы для самостоятельного подбора турпродукта, которые используют технологии искусственного интеллекта для сравнительного анализа ТП с учетом собственного опыта и опыта других туристов. Туристам для выбора турпродуктов, синтеза оптимальных маршрутов, подбора оптимальных средств и способов передвижения, выбора мест ночевки и питания с учетом временных, пространственных и финансовых параметров, приходится использовать сразу ряд навигационных сервисов, сервисов бронирования билетов, отелей, автотранспорта, сайтов с туристической информацией, сайтов с отзывами других путешественников и т.д., что требует серьезных трудозатрат и замедляет развитие туризма из-за отсутствия единого комплексного цифрового сервиса с максимально полным доступом к другим системам и базам данных.

Одной из задач проекта является создание архитектуры цифрового рекомендательного мобильного сервиса для предоставления максимально полной и подробной информации о ТП. Предлагаемый пользователю ТП должен включать подробный маршрут с метаданными, полную информацию о средствах перемещения, местах стоянок и ночевки с описанием мест проживания и питания, информацию о достопримечательностях на маршруте, предварительную оценку временных и финансовых затрат на путешествие и другую необходимую информацию. Синтез или подбор ТП реализуется на основе анализа индивидуальных или групповых туристических предпочтений, с учетом психофизиологических особенностей туриста, сравнительного анализа схожих ТП и с учетом собственного приобретенного опыта путешествий и опыта других туристов в виде отзывов, видеоблогов, описаний путешествий, представленных в открытом доступе в сети Интернет. Так как такой информации в настоящее время очень много, то для ее поиска и обработки в проекте используются технологии сбора, интеллектуального анализа и консолидации больших данных. Результатом работы рекомендательного сервиса является синтез альтернативных ТП с рекомендацией оптимального маршрута с последующим навигационным сопровождением путешественника для корректировки маршрута с учетом текущей обстановки, временных и финансовых затрат, пожеланий пользователя, а также для сохранения заметок и отзывов путешественника о точках на маршруте для накопления собственного опыта, анализа и синтеза других турпродуктов. Каждый синтезированный и освоенный в процессе путешествия продукт сохраняется в иерархической базе данных, синтезированной в виде распределенного реестра (блокчейн) и хешируется для уникальной идентификации с целью защиты от несанкционированного доступа и компрометации. Это необходимо, так как в современных туристических сервисах, сервисах бронирования, рейтинговой оценки и т.п. преобладают в основном положительные отзывы, которые пишут менеджеры туристских объектов, нанятые блогеры или боты. При этом отрицательные

отзывы и описания удаляются, так как доступ к ним определяется системными администраторами информационных сервисов туристских объектов.

В данном проекте под туристским продуктом понимается детально проработанный маршрут, который формируется интеллектуальной системой в интерактивном режиме на основе интеллектуального анализа больших данных о существующих компонентах будущего продукта, особенностей и предпочтений путешественника и членов его группы, ретроспективных данных о собственном опыте путешествий и данных о стороннем опыте аналогичных путешествий другими туристами.

В предыдущих исследованиях был сделан вывод о необходимости разработки универсальной цифровой платформы [2,3] с мобильным приложением для рекомендательного проектирования и выбора оптимальных туристских маршрутов для отдельных путешественников, семей или малых групп (до 15 человек). Категория массового туризма и подбор ТП для больших групп на данном этапе не рассматривается, так как такие группы, как правило, не планируют самостоятельные путешествия и с ними, по нашему мнению, должны работать специализированные турфирмы. Сложность разработки цифровой платформы определяется необходимостью моделирования различных туристических бизнес-процессов, которые определяются формальными моделями. Модели описывают предпочтения отдельных пользователей в группах и их интересы на основе равновесия Нэша и других моделях теории игр, способы перемещения, топологии и критерии оптимальности маршрутов с учетом временных, пространственных, финансовых и прочих факторов на основе моделей многокритериальной оптимизации, формы проживания и питания, принципы осмотра достопримечательностей, факторы влияния окружающей среды на синтез и реализацию ТП. При этом, несмотря на выбор и применение существующих моделей бизнес-процессов, каждый турист должен иметь возможность учета экспертных оценок всех элементов маршрута со стороны других пользователей.

Проведем критический анализ потенциальных методов и подходов, позволяющих реализовать вышеуказанные задачи.

Обзор литературы

Примером работы в области применения методов промышленной интеграции информации для решения транспортных задач является статья [4], в которой рассмотрена проблема оптимизации маршрутов передвижения транспортных средств с целью снижения энергопотребления и загрязнения окружающей среды. Предложена модель многоцелевой оптимизации множества маршрутов с использованием алгоритма элитарной генетической сортировки без доминирования для минимизации стоимостных и временных затрат в процесс движения транспортных средств, а также снижения выбросов углеродных компонент. Окончательный маршрут выбирается в процессе принятия решений согласно методу серого реляционного анализа и на основе оценки значения информационной энтропии. Авторы статьи [5] предлагают двухэтапный гибридный алгоритм для решения задачи маршрутизации транспортных средств с целью оптимизации логистики и планирования. В статье [6] предлагается многокритериальная модель оптимизации передвижения между множеством точек для минимизации общего числа маршрутов, затрат на поездки

и уменьшения количества длинных маршрутов. Многоцелевая оптимальная модель маршрутов транспортных средств с минимальной общей стоимостью, объемом выбросов углеродных компонент и минимальной вероятностью риска аварии с учетом экологических факторов также предложена в [7].

В работе [8] авторы разработали многоцелевую модель маршрутизации транспортных средств с учетом таких ограничений, как количество клиентов, количество транспортных средств и вместимость, на основе интеграции алгоритма роя частиц и алгоритма пчелиной колонии. В работе [9] авторы также применили алгоритм искусственной пчелиной колонии для решения трехкритериальной модели маршрутизации транспортных средств. А в работе [10] предложен улучшенный алгоритм множественных муравьиных колоний для оптимизации передвижения транспортных средств.

Авторы статьи [11] разработали двухцелевую модель оптимизации маршрутов транспортных средств, направленную на минимизацию расстояния и числа транспортных средств для группы пользователей с целью максимального удовлетворения клиентов на основе алгоритма имитации отжига и генетического алгоритма. В работе [12] исследователи применили элитарный генетический алгоритм сортировки без доминирования (NSGA-II), обладающий высокой надежностью и гибкостью, для решения задач оптимизации маршрутизации с двумя и тремя целями. Другие авторы в статье [13] описали использование аналогичного алгоритма NSGA-II для синтеза модели маршрутизации транспортных средств с временными окнами, доказав высокую эффективность и применимость метода для решения похожих задач.

В многочисленных исследованиях многокритериальной задачи оптимизации маршрутов движения транспортных средств с синтезом оптимальных по Парето решений для выбора оптимального пути используется множество подходов.

Например, в работе [12] авторы использовали многокритериальный эволюционный алгоритм для получения оптимального решения Парето, а затем применили стохастический анализ, многоатрибутный анализ для выбора приемлемых вариантов передвижения. Исследователи в статье [15] предложили гибридный алгоритм синтеза оптимальных путей, основанный на алгоритме муравьиной колонии, для решения многокритериальной задачи оптимизации маршрутизации. Выбор оптимального пути при этом остается за лицами, принимающими решения, которые выбирают подходящий путь в соответствии со своими потребностями и состоянием целевых затрат по различным направлениям. В работе [16] авторы рассматривают условия дорожного движения в реальном времени и строят двухцелевую модель передвижения транспортных средств в соответствии с экономическими и экологическими целями на основе алгоритма локального поиска ближайших соседей. Для выбора оптимального решения использовалось сочетание методов многоатрибутного принятия решений и статистического анализа участков маршрута. Авторы статьи [17] решают задачу маршрутизации транспорта с пятью целями на основе многокритериального метода принятия решений по серой цели, основанного на оценке информационной энтропии, с последующим ранжированием маршрутов с учетом субъективных мнений, объективных критериев и характеристик логистических целей. Такой подход имеет преимущества, так как позволяет присваивать веса целевым объектам маршрутизации в соответствии с объективными

данными, затем взвешивать альтернативные маршруты и посредством ранжирования целей и маршрутов определять оптимальную схему передвижения на основе оценки расстояния до целей и альтернативных маршрутов.

Кроме того, следует проанализировать возможности сквозной технологии распределенного реестра в целях решения задач настоящего исследования.

Тематика блокчейна является актуальной для исследователей во всем мире, однако большинство исследований связано с криптовалютами. В частности, только в архиве публикаций IEEE Xplore есть более 2500 публикаций по теме блокчейн за 2021 г. Это связано с тем, что технология распределенного реестра (блокчейн) – это одна из самых развивающихся и надежных технологий безопасного хранения и обмена данными. Следует отметить, что технологии распределенного реестра и децентрализованных приложений на основе блокчейна реализуются в различных предметных областях человеческой деятельности.

Часто систему распределенного реестра создают для мониторинга и анализа государственных услуг. Здесь смарт-контракты фиксируют записи и предлагают решения в области судебных разбирательств, ведут оценку рисков предоставления государственных контрактов частным компаниям.

Технология распределенного реестра сегодня активно внедряется в системах Internet of Things (IoT). Большинство систем IoT передают потоки данных с сенсорных узлов через маршрутизаторы на облачные сервера, что вызывает проблемы конфиденциальности и целостности информации при передаче через публичные каналы связи, обработке на облачных серверах сторонних провайдеров и т.п. Технологии блокчейна позволяют решать данные проблемы.

Данная статья является продолжением серии научных статей, посвященных разработке моделей и методов повышения эффективности функционирования цифровых туристских экосистем [1–3].

Материалы и методы

Модель управления жизненным циклом ТП в регионе с использованием цифровых двойников-аватаров туристов обобщенно можно представить в виде алгоритмического процесса, включающего следующие этапы:

1. Разработка анкетного опросника предпочтений туриста, требуемого для синтеза матрицы предпочтений его цифрового аватара и синтеза ТП.
2. Синтез оптимальных вариантов реализации туристского маршрута (изображения возможных туристических маршрутов предлагаются на карте), представляющих схемы перемещения туриста между ключевыми точками на маршруте с временными, пространственными, финансовыми и прочими характеристиками участков.
3. Синтез цифрового аватара туриста, представляющего собой виртуальную систему с ключевыми параметрами, характеризующими его предпочтения и психофизиологические особенности.
4. Представление ТП и матриц предпочтений цифровых аватаров в виде цепочки блоков распределенного реестра с уникальными хеш-идентификаторами. Привязка блоков с матрицами предпочтений к номерам телефонов туристов, а блоков с формализованными описаниями ТП к наборам координат,

адресов и наименований особых точек синтезированных туристических маршрутов.

5. Кластеризация цифровых аватаров туристов. Каждый кластер объединяет схожих по предпочтениям туристов (групп), совмещает их предпочтения на основе усреднения ключевых параметров. Это позволяет системе предлагать рекомендации по выбору маршрутов и синхронизировать различные варианты туристических маршрутов с учетом собственного опыта туриста и опыта других пользователей системы. Кластеризация цифровых аватаров проходит по каждому виду туризма:

1) кластеризация, осуществляемая на основе предпочтений других цифровых аватаров туристов;

2) кластеризация по собственному накопленному опыту отдельного туриста для последующей индивидуализации предложения ТП.

6. Кластеризация ТП по степени схожести маршрутов, описаний ключевых точек и участков с похожими характеристиками в соответствии с матрицами предпочтений цифровых аватаров туристов. Сравнительный анализ и оценка множества альтернативных ТП с целью выбора маршрута, оптимального для конкретного туриста и/или группы согласно предпочтениям, особенностям и возможностям.

В целях разработки методики представления и кластеризации цифровых аватаров туристических профилей с нечеткими формулировками предпочтений целесообразно применить методы синтеза графовых маршрутов, многокритериальной оптимизации и принятия решений. В целях обеспечения информационной безопасности необходимо использование технологии распределенного реестра. Для кластеризации туристских продуктов применен метод бенчмаркинга.

Результаты

Для представления данных о туристских продуктах и персональных данных о туристах выбрана модель иерархической системы данных на основе технологии распределенного реестра (блокчейн). Атрибутивное виртуальное представление туриста в виде его цифрового аватара сохраняется в иерархической базе данных, представляющей распределенный реестр с уникальной идентификацией туристских продуктов и аватаров посредством хеширования с целью защиты от несанкционированного доступа и компрометации. Выбор подобного типа модели и структуры данных обусловлен необходимостью использования современных технологий обеспечения информационной безопасности.

Технология распределенного реестра представляет способ обеспечения надежности, уникальности и целостности цифровых файлов, а также повышения устойчивости данных к взломам и кибератакам [18]. Для идентификации блоков данных в распределенном реестре используется уникальный идентификатор в виде результата вычисления хеш-функции, который добавляется в его заголовок, а также к любым транзакциям с данными блока. Сам реестр формируется из блоков транзакций, связанных посредством включения хеша предыдущего блока в структуры данных текущего блока и вычисления его хеша. Транзакциями в нашем случае будем считать операции по формированию и изменению блоков данных с информацией о пользователе и его

туристических предпочтениях в распределенном реестре их цифровых аватаров, а также операции по формированию и изменению блоков данных о синтезируемых туристических маршрутах в распределенном реестре туристских продуктов. Таким образом, формируются две цепочки блоков данных, связи между блоками которых устанавливаются в процессе выбора пользователями туристских продуктов и согласования их параметров с предпочтениями туристов. Блоки данных из реестра туристских продуктов содержат характеристики туристических предпочтений и данных пользователей из реестра цифровых аватаров, временные, пространственные, финансовые и прочие логистические данные о туристическом маршруте, а также информацию о ключевых точках с текстовыми и графическими (фотографиями, изображениями, анимацией) материалами, аудио и видеозаписями, ссылками на сторонние сервисы и информационные ресурсы для удобства пользователей при выборе или синтезе туристского продукта.

Поддержание целостности накапливаемой информации в распределенных реестрах обеспечивается способом тройного хеширования. Связи последовательных записей каждого реестра реализуются двумя хешами, которые вычисляются для основного содержимого записи и для метаданных. При этом каждый из вычисляемых хешей используется для вычисления другого. Полученный хеш вставляется в заголовок следующей записи. Третья пара хешей устанавливает связь между двумя реестрами. При выборе маршрута для конкретного пользователя вычисляемый хеш его цифрового аватара вставляется в заголовок блока данных с выбранным туристским продуктом, и, наоборот, хеш выбранного продукта добавляется в блок данных цифрового аватара. В дальнейшем число хешей туристских продуктов, накапливаемых в блоке цифрового аватара пользователя, используется как оценка его туристического опыта и позволяет присваивать ему рейтинг туриста в зависимости от количества путешествий. Если хеш не обнаружен в записи или не совпадает после вычисления, то это означает, что данная запись была модифицирована.

Для проверки подлинности цифровых аватаров пользователей и туристских продуктов применяется смарт-контракт, выполняющий алгоритм линейной гомоморфной цифровой подписи аватара (продукта) (LHS) [19, 20]. Проверяемый идентификатор цифрового аватара или продукта (уникальная сигнатура) синтезируется путем комбинации двух хеш-функций:

а) $H_1(Id, (X, Y))$, где входными данными являются идентификатор цифрового аватара (продукта) Id , координаты широты и долготы (X, Y) места нахождения пользователя (стартовой точки маршрута);

б) $H_2(T)$, где T – точка на эллиптической кривой в конечном поле с координатами (x, y) :

$$\{(x, y) \in (\mathbb{R}_p)^2 \mid y^2 = x^3 + ax + b \pmod{p}, 4a^3 + 27b^2 \not\equiv 0 \pmod{p}\} \cup \{0\}, \quad (1)$$

где $\mathbb{R}_p$ – конечное поле целых чисел a, b по модулю p ; 0 – точка в бесконечности.

Точка эллиптической кривой включена для повышения безопасности данных цифрового аватара (продукта), чтобы усложнить процедуру возможной расшивки сигнатуры, которая базируется на проблеме дискретного логарифма в группе точек эллиптической кривой. Сгенерированную подпись можно представить как комбинированный хеш S :

$$S = (H_1(Id, (X, Y)), H_2(T(x, y))). \quad (2)$$

Для вычисления первой части цифровой подписи $H_1(Id, (X, Y))$ применяется алгоритм SHA-256 (Secure Hash Algorithm), который является алгоритмом хеширования биткойна. Для синтеза второй части подписи $H_2(T(x, y))$ используется алгоритм с открытым ключом ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm), определенный в группе точек эллиптической кривой.

Генерация цифровой подписи аватара (продукта) выполняется по алгоритму:

- 1) выбор случайного целого числа $m \in \{1, \dots, n-1\}$, где n – порядок группы;
- 2) определение точки на кривой $T = mP$, где P – базовая точка подгруппы;
- 3) расчет параметра $y = x_P \bmod n$, где x_P – координата x точки P ;
- 4) если $y = 0$, то выбор другого числа m и переход к пункту 2;
- 5) вычисление цифровой подписи аватара (продукта) $S = m^{-1} (H_2 + x H_1) \bmod n$;
- 6) если $S = 0$, то выбирается другое число m и переход к пункту 2.

Валидация цифровых аватаров и туристских продуктов необходима для разрешения установления связей между туристическими профилями пользователей и выбранными туристическими маршрутами, а также для обнаружения поддельных аватаров и некорректных туристских продуктов. Выявленные «плохие» туристские продукты и скомпрометированные цифровые аватары удаляются из системы, а их хеши добавляются в черный список.

Спектр моделей оптимальных турпродуктов представляет собой множество векторных моделей описаний ТП и их представление в виде графовых моделей с целью дальнейшей многокритериальной оптимизации. Критерии оптимизации выбираются в зависимости от способа передвижения туриста. Примерами наборов оптимизационных критериев могут быть следующие:

1. Для пеших туристов критериями могут быть: минимум расстояния между последовательными точками маршрута, максимум точек на маршруте с учетом средней скорости туриста и времени на их осмотр, наличие на маршруте мест остановок, питания, туалетов.

2. Для велотуристов критериями могут быть: минимум расстояния между последовательными точками маршрута, максимум точек на маршруте с учетом средней скорости велотуриста и времени на их осмотр, наличие на маршруте мест остановок, питания, туалетов и ночлега.

3. Для автотуристов, передвигающихся на общественном транспорте, критериями могут быть: минимум времени на передвижение (с учетом времени движения между точками в соответствии с расписанием движения транспорта) за заданное время движения в сутки, минимум стоимости передвижения или заданная стоимость билетов, максимум достопримечательностей с учетом времени на их осмотр, наличие на маршруте мест остановок, питания и ночлега.

4. Для туристов, передвигающихся на личном автотранспорте, критериями могут быть: минимум времени на передвижение (с учетом времени движения между точками, которое вычисляется на основе навигационных систем Яндекс и Гугл) за заданное время движения в сутки, минимум стоимости передвижения, максимум достопримечательностей за светлое время суток с учетом времени на их осмотр, наличие на маршруте мест заправок, остановок, питания и т.п.

Векторная модель описания точки маршрута представляет собой численное представление группы семантически связанных слов или фраз. Метод перехода к векторной модели подготавливает описание точки к извлечению метаданных. Векторное представление слов, характеризующих точку маршрута (достопримечательность, место ночевки, питания и т.п.) является наиболее компактным типом данных для хранения и последующего интеллектуального анализа. Векторное представление учитывает контекст, что позволяет структурировать информацию, написанную в свободной естественно-языковой форме, в виде системы векторов и перейти к ее графовому представлению для распознавания и кластеризации. Фактически описания особых туристических точек в свободной форме транслируются в формализованные описания, составленные из наборов ключевых слов. Новые ключевые слова, отсутствующие в словаре, будут добавлены в ходе синтеза векторной модели, реализуя процесс машинного обучения модели описания ТП.

Метод кластеризации туристских продуктов

Результатом предыдущего этапа является множество кластеров туристических аватаров с найденным центроидом кластера с усредненными туристическими предпочтениями. Сходство предпочтений конкретного пользователя, отнесенного к кластеру, определяется степенью близости к его центроиду. В связи с возможной нечеткостью туристических предпочтений отдельного туриста он может попасть в несколько кластеров с примерно равными степенями близости к их центроидам.

На следующем этапе выбирается спектр туристских продуктов для пользователя. В спектр туристских продуктов могут попасть следующие маршруты:

а) все маршруты, связанные со всеми кластерами, выбранные по заданной величине порога степени близости туристического аватара к их центроидам (полный охват возможных продуктов, где пользователю может быть предложено максимальное число маршрутов для выбора);

б) все маршруты, связанные с одним или несколькими кластерами, у которых зафиксирована максимальная степень близости с центроидом (охват всех продуктов, которые ранее спроектированы другими пользователями одного кластера или несколькими с равными максимальными степенями близости);

в) маршруты, связанные с конкретными туристическими аватарами одного кластера, к которому принадлежит матрица предпочтений туриста, ранжированными по степени близости к его аватару с отбором продуктов согласно заданному порогу (охват продуктов, максимально схожих с матрицей предпочтений туриста);

г) маршруты, синтезированные по матрице предпочтений конкретного туриста, без привязки к кластерам и центроидам.

Взаимосвязь между векторами признаков (матрицей предпочтений, туристическим профилем) аватаров в кластерах кластеров и туристскими продуктами можно представить в виде взвешенного графа с двумя подграфами

$$G = (V_1, V_2, E),$$

где V_1 – множество вершин, которые представляют туристические аватары, сгруппированные в кластеры с виртуальными аватарами-центроидами V_{ai} , V_2 – множество вершин туристских продуктов; $E = \{ \langle \mu(v_i, v_j) / (v_i, v_j) \rangle \}$ – множество ребер, устанавливающих связи продуктов с предпочтениями туристов с весами $\mu \in [0,5; 1]$, которые определяют функцию нечеткой принадлежности готового маршрута матрице предпочтений туриста (рис. 1).

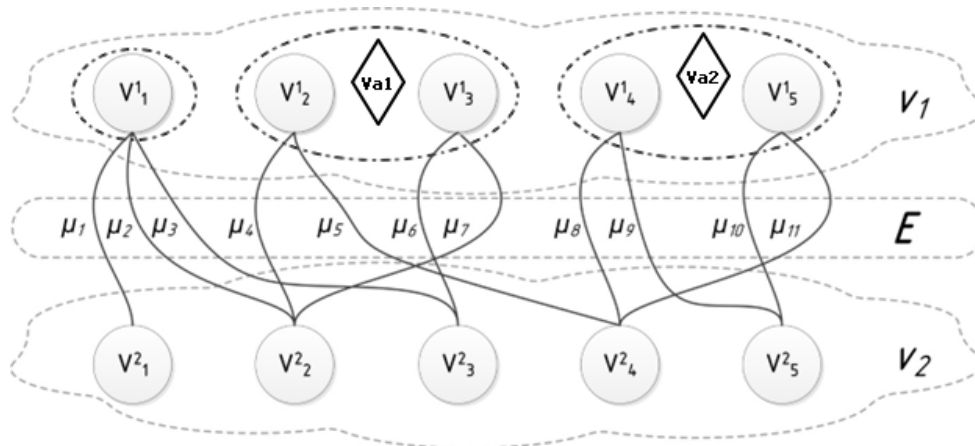


Рис. 1. Взвешенный граф туристических аватаров и продуктов

Ребра с весами меньше 0,5 исключаются при синтезе графа, так как нас не интересуют продукты, слабо связанные по степени сходства с матрицами туристических предпочтений. Веса ребер представляют нормированную оценку степени близости векторов признаков аватаров и продуктов.

Так как число туристских продуктов со временем становится достаточно большим и туристу может быть слишком сложно в них ориентироваться, а также для того чтобы предлагать туристу продукты от множества реальных туристических аватаров, а не от виртуального аватара-центроида с усредненными предпочтениями, на первом этапе задачи выбора целесообразно выполнить кластеризацию туристских продуктов относительно аватаров и сравнить полученные кластеры продуктов с множеством продуктов, отнесенных к виртуальному аватару-центроиду.

В данном случае предлагается провести кластеризацию непосредственно на графе. Входными и выходными данными будет граф, представленный в виде матрицы смежности, с элементами в виде весов ребер. Для кластеризации вершин туристских продуктов задается «критерий схожести», метрическое пространство и функция метрики для каждой пары вершин графа.

Алгоритм кластеризации графа представляет функцию $F : V \rightarrow V'$, которая вершинам графа V_i ставит в соответствие кластеры V' . Веса ребер μ , которые в конечном счете представляют степень схожести предпочтений туриста вектору признаков туристического маршрута, будем также считать степенью схожести самих туристских продуктов и метрикой расстояния между

вершинами графа. В процессе кластеризации они нормируются и заменяются общей интегральной оценкой схожести кластера продуктов с матрицей предпочтений конкретного туриста. Результатом кластеризации считается граф $G' = (V'_1, V'_2, E')$, где V'_1 и V'_2 – подмножества туристических аватаров и кластеров туристских продуктов с интегральными весами μ' . С математической точки зрения вершины, объединяемые в кластер, должны иметь минимальное среднее внутрикластерное и максимальное межкластерное расстояние. Так как в нашем случае в кластер объединяются вершины с максимальной степенью сходства туристских продуктов, то процедура минимизации/максимизации расстояний состоит в выборе порогового значения веса μ для ребер e_i . При этом ребра с весом больше порогового значения будут объединять вершины одного кластера. В общем случае вершины могут одновременно принадлежать нескольким кластерам, так как разные продукты могут иметь схожие векторы признаков.

В качестве базового алгоритма кластеризации на данном этапе выбран Лувенский метод (Louvain) [21], который показывает большую точность и вычислительную скорость на графовых моделях и сетях с известной структурой. В основе алгоритма лежит определение и оптимизация коэффициента модульности кластеров вершин. Коэффициент модульности в оригинальном алгоритме представляет собой плотность ребер внутри кластера в диапазоне $[-1, 1]$ в сравнении с количеством межкластерных ребер. Фактически модульность – это сумма весов ребер, инцидентных вершине внутри кластера, за минусом суммы весов ребер вершины, связанных с вершинами других кластеров. В нашем случае при определении коэффициента модульности учитываются только веса ребер, которые больше заданного порогового значения. Ребра с меньшими весами, чем пороговое значение, не учитываются при кластеризации. При этом величина порога подбирается итерационно, в зависимости от размеров получаемых кластеров. Первоначально задается величина 0,75, и если в результате получается большее число вырожденных кластеров (вырожденными считаются кластеры с одной вершиной), то порог снижается на 0,05, и, наоборот, если все вершины попадают в один кластер, то порог увеличивается на 0,05 и процесс кластеризации повторяется. Алгоритм заканчивает работу при нахождении оптимального числа невырожденных кластеров.

Значение коэффициента модульности рассчитывается как

$$M = \frac{1}{2r} \sum_{i,j} \left[\mu_{i,j} - \frac{\sum \mu_{e_i} \sum \mu_{e_j}}{2r} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (3)$$

где M – модульность; r – сумма весов ребер подграфа ($r > p$), которые имеют веса больше заданного порога p ; $\mu_{i,j}$ – вес ребра между вершинами i и j , которые могут объединиться в кластер ($\mu_{i,j} > p$), μ_{e_i} и μ_{e_j} – веса ребер e_i и e_j , инцидентных вершинам i и j ($\mu_{e_i} > p, \mu_{e_j} > p$), c_i, c_j – кластеры с вершинами i и j , $\Delta(c_i, c_j)$ – дельта Кронекера – индикатор равенства кластеров ($\delta(x, y) = 1$, если $x = y$, если нет – 0).

Коэффициент модульности отдельного кластера определяется как

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^c}{2r} - \left(\frac{\sum_{i=1}^k (\mu_i^c + \mu_i^o)}{2r} \right)^2, \quad (4)$$

где M_c – модульность кластера; μ_i^c – вес внутрикластерного ребра, больший порога ($\mu > p$); μ_i^o – вес межкластерного ребра, больший порога ($\mu > p$); n – число внутрикластерных ребер; k – общее число ребер, инцидентных всем вершинам кластера.

В алгоритме можно выделить следующие шаги:

1. На первой стадии выполняется поиск локальных кластеров минимальных размеров с оптимальным значением функции модульности. Каждой вершине присваивается номер своего кластера, и рассчитывается модульность кластеров.

2. Выбирается произвольный кластер, из которого вершина переставляется по очереди в каждый соседний кластер. После перестановки подсчитывается изменение коэффициента модульности ΔM до и после перестановки вершины и выбирается кластер с наибольшим изменением модульности $\max \Delta M > 0$, в котором закрепляется переставленная вершина. Если ни одна из перестановок не увеличивает модульность, то вершина остается в том же кластере. Данный пункт повторяется, пока изменения коэффициента не останутся неизменными.

3. Граф с кластерами преобразуется в мультиграф. Вершины кластеров объединяются в одну с преобразованием ребер между ними в петли, а кратные ребра между полученными вершинами заменяются одним. Новые веса петель и ребер пересчитываются как среднее арифметическое из весов старых ребер.

4. Пункты 2 и 3 повторяются, пока не будет достигнута оптимальная величина коэффициента модульности (когда изменений модульности больше не будет происходить).

Алгоритм Лувена использован в качестве функции оптимизации при определении схожести матриц предпочтений туристов с рекомендуемыми туристскими продуктами, востребованных профессий и квалификаций специалистов. Число кластеров туристских продуктов жестко не определяется и может меняться в процессе обучения системы и при добавлении новых аватаров и синтезируемых маршрутов. Ограничениями являются пороговые величины весов ребер, которыми можно варьировать, изменяя тем самым число предлагаемых туристу продуктов.

Метод сравнительного анализа (бенчмаркинга) туристских продуктов

Кластеризация туристских продуктов позволяет определить группы схожих маршрутов. Однако такие продукты предлагаются пользователю по его предпочтению как единая целостная структура. Пользователь может быть уже знаком с частью маршрута, и ему нужен новый незнакомый маршрут с учетом уже пройденного, синтезированный из нескольких согласно его предпочтениям. Чтобы не решать снова задачу синтеза нового маршрута, пользователь может отметить уже пройденный маршрут, и тогда решается задача поиска

аналогичных частей в готовых продуктах с их последующим исключением и формированием нового продукта. Задача поиска и выделения схожих частей маршрута представляет собой решение задачи выделения изоморфных подграфов в графах маршрутов и оценки степени их сходства. Степень сходства вычисляется как оценка степени изоморфизма подграфов. Задачу выделения изоморфных подграфов также можно свести к задаче кластеризации графа маршрутов Лувенским методом. Для снижения размерности задачи из графовой модели маршрутов исключаются ребра с весами меньше 0,5, т.е. фрагменты со степенью схожести менее 50 % считаются нетождественными. В процессе работы алгоритма схожие фрагменты помещаются в один кластер с вычислением изменений коэффициентов модульности и выбором максимального изменения и затем объединяются. В ходе выделения изоморфных подграфов выполняется одновременно процедура синтеза нового маршрута с исключением фрагментов схожими с частями знакомого маршрута, отмеченного пользователем на маршрутном графе.

Заключение

Таким образом, в данной статье авторами разработана и представлена оригинальная методика кластеризации предпочтений туристских профилей и туристских продуктов, многокритериальный метод синтеза туристских маршрутов, а также метод сравнительного анализа (бенчмаркинга) туристских продуктов. Реализация данных методик на практике предоставит туристам арсенал инструментов для самостоятельного подбора турпродукта с использованием технологии искусственного интеллекта для сравнительного анализа туристских продуктов с учетом собственного опыта и опыта других туристов. Это вносит определенный вклад в решение проблемы разработки единой цифровой туристской экосистемы региона с максимально полным доступом пользователей (туристов) к другим системам и базам данных.

Реализация подобных сервисов в системе управления туристической отраслью несомненно повысит туристскую привлекательность территории, эффективность управления региональным туристским продуктом на всех этапах его жизненного цикла и в конечном итоге обеспечит рациональное использование и оптимизацию управления туристической отраслью региона.

В дальнейшей работе перспективными являются теоретико-методологические разработки и системные исследования в области проектирования цифровой кросс-отраслевой экосистемы туризма на условиях государственно-частного партнерства с учетом цифровизации и интеграции отдельных информационных систем федеральных ведомств, региональных органов власти и государственных сервисов.

Список литературы

1. Гамидуллаева Л. А., Зинченко С. В. Аспекты управления жизненным циклом туристского продукта как инструмента развития туризма территории // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 4. С. 5–26. doi: 10.21685/2227-8486-2022-4-1
2. Gamidullaeva L., Vasin S., Tolstykh T., Zinchenko S. Approach to Regional Tourism Potential Assessment in View of Cross-Sectoral Ecosystem Development // Sustainability. 2022. № 14 (22). P. 15476. doi: 10.3390/su142215476

3. Gamidullaeva L., Finogeev A., Kataev M., Bulysheva L. A Design Concept for a Tourism Recommender System for Regional Development // *Algorithms*. 2023. № 16 (1). P. 58. doi: 10.3390/a16010058
4. Guo K., Hu S., Zhu H., Tan W. Industrial information integration method to vehicle routing optimization using grey target decision // *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. Vol. 27. P. 100336. doi: 10.1016/j.jii.2022.100336
5. Abdirad M., Krishnan K., Gupta D. A two-stage metaheuristic algorithm for the dynamic vehicle routing problem in industry 4.0 approach // *Journal of Management Analytics*. 2021. № 8 (1). P. 69–83.
6. Sánchez-Oro J., López-Sánchez A. D., Colmenar J. M. A general variable neighborhood search for solving the multi-objective open vehicle routing problem // *Journal of Heuristics*. 2020. № 26 (3). P. 423–452.
7. Abdullahi H., Reyes-Rubiano L., Ouelhadj D. [et al.]. Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem // *European Journal of Operational Research*. 2021. № 292 (1). P. 143–154.
8. Sedighzadeh D., Mazaheripour H. Optimization of multi objective vehicle routing problem using a new hybrid algorithm based on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm considering Precedence constraints // *Alexandria Engineering Journal*. 2018. № 57 (4). P. 2225–2239.
9. Baradaran V., Shafaei A., Hosseini A. H. Stochastic vehicle routing problem with heterogeneous vehicles and multiple prioritized time windows: mathematical modeling and solution approach // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. № 131 (3). P. 187–199.
10. Goel R., Maini R. Improved multi-ant-colony algorithm for solving multi-objective vehicle routing problems // *Scientia Iranica*. 2019. № 26 (4). P. 1–26.
11. Yousefi H., Tavakkoli-Moghaddam R., Oliaei M. [et al.]. Solving a bi-objective vehicle routing problem under uncertainty by a revised multi-choice goal programming approach // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2017. № 8 (3). P. 283–302.
12. Ahmed F., Deb K. Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms // *Soft Computing*. 2013. № 17 (7). P. 1283–1299.
13. Srivastava G., Singh A., Mallipeddi R. NSGA-II with objective-specific variation operators for multiobjective vehicle routing problem with time windows // *Expert Systems Applications*. 2021. № 176 (4).
14. Du T. S., Guo H. X., Pan W. W. [et al.]. Multi-objective evolutionary algorithm based on location and path problem of oilfield dangerous goods logistics system // *Journal of Systems Management*. 2018. № 27 (4). P. 739–752.
15. Masoumi Z., Van Genderen J., Sadeghi Niaraki A. An improved ant colony optimization-based algorithm for user-centric multi-objective path planning for ubiquitous environments // *Geocarto International*. 2019. № 34 (3). P. 1–18.
16. Jin Y., Ge X., Zhang L. [et al.]. A two-stage algorithm for bi-objective logistics model of cash-in-transit vehicle routing problems with economic and environmental optimization based on real-time traffic data // *Journal of Industrial Information Integration*. 2021. doi: 10.1016/j.jii.2021.100273
17. Qiu Y., An S., Rahman A. [et al.]. Evaluation and optimization of bridge deck waterproof bonding system using multi-objective grey target decision method // *Road Material Pavement Design*. 2020. № 21 (7). P. 1844–1858.
18. Franco P. The Blockchain // *Understanding Bitcoin: Cryptography, Engineering and Economics*. John Wiley & Sons, 2014. 288 p.
19. Lin Ch.-J., Xue R., Yang S.-J. [et al.]. Linearly Homomorphic Signatures from Lattices // *The Computer Journal*. 2020. № 63. P. 1871–1885. doi: 10.1093/comjnl/bxaa034
20. Chen W., Lei H., Qi K. Lattice-based linearly homomorphic signatures in the standard model // *Theoretical Computer Science*. 2016. № 634. P. 47–54. doi: 10.1016/j.tcs.2016.04.009

21. Lancichinetti A., Fortunato S. Benchmarks for testing community detection algorithms on directed and weighted graphs with overlapping communities // *Physical Review E*. 2009. № 80 (1).

References

1. Gamidullaeva L.A., Zinchenko S.V. Aspects of the life cycle management of a tourist product as a tool for the development of tourism in the territory. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(4):5–26. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2022-4-1
2. Gamidullaeva L., Vasin S., Tolstykh T., Zinchenko S. Approach to Regional Tourism Potential Assessment in View of Cross-Sectoral Ecosystem Development. *Sustainability*. 2022;(14):15476. doi: 10.3390/su142215476
3. Gamidullaeva L., Finogeev A., Kataev M., Bulysheva L. A Design Concept for a Tourism Recommender System for Regional Development. *Algorithms*. 2023;(16):58. doi: 10.3390/a16010058
4. Guo K., Hu S., Zhu H., Tan W. Industrial information integration method to vehicle routing optimization using grey target decision. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022;27:100336. doi: 10.1016/j.jii.2022.100336.
5. Abdirad M., Krishnan K., Gupta D. A two-stage metaheuristic algorithm for the dynamic vehicle routing problem in industry 4.0 approach. *Journal of Management Analytics*. 2021;(8):69–83.
6. Sánchez-Oro J., López-Sánchez A. D., Colmenar J. M. A general variable neighborhood search for solving the multi-objective open vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*. 2020;(26):423–452.
7. Abdullahi H., Reyes-Rubiano L., Ouelhadj D. et al. Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2021;(292):143–154.
8. Sedighzadeh D., Mazaheripour H. Optimization of multi objective vehicle routing problem using a new hybrid algorithm based on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm considering Precedence constraints. *Alexandria Engineering Journal*. 2018;(57):2225–2239.
9. Baradaran V., Shafaei A., Hosseinian A.H. Stochastic vehicle routing problem with heterogeneous vehicles and multiple prioritized time windows: mathematical modeling and solution approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2019;(131):187–199.
10. Goel R., Maini R. Improved multi-ant-colony algorithm for solving multi-objective vehicle routing problems. *Scientia Iranica*. 2019;(26):1–26.
11. Yousefi H., Tavakkoli-Moghaddam R., Oliaei M. et al. Solving a bi-objective vehicle routing problem under uncertainty by a revised multi-choice goal programming approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2017;(8):283–302.
12. Ahmed F., Deb K. Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms. *Soft Computing*. 2013;(17):1283–1299.
13. Srivastava G., Singh A., Mallipeddi R. NSGA-II with objective-specific variation operators for multiobjective vehicle routing problem with time windows. *Expert Systems Applications*. 2021;(176).
14. Du T.S., Guo H.X., Pan W.W. et al. Multi-objective evolutionary algorithm based on location and path problem of oilfield dangerous goods logistics system. *Journal of Systems Management*. 2018;(27):739–752.
15. Masoumi Z., Van Genderen J., Sadeghi Niaraki A. An improved ant colony optimization-based algorithm for user-centric multi-objective path planning for ubiquitous environments. *Geocarto International*. 2019;(34):1–18.

16. Jin Y., Ge X., Zhang L. [et al.]. A two-stage algorithm for bi-objective logistics model of cash-in-transit vehicle routing problems with economic and environmental optimization based on real-time traffic data. *Journal of Industrial Information Integration*. 2021. doi: 10.1016/j.jii.2021.100273
17. Qiu Y., An S., Rahman A. et al. Evaluation and optimization of bridge deck waterproof bonding system using multi-objective grey target decision method. *Road Material Pavement Design*. 2020;(21):1844–1858.
18. Franco P. The Blockchain. *Understanding Bitcoin: Cryptography, Engineering and Economics*. John Wiley & Sons, 2014:288.
19. Lin Ch.-J., Xue R., Yang S.-J. et al. Linearly Homomorphic Signatures from Lattices. *The Computer Journal*. 2020;(63):1871–1885. doi: 10.1093/comjnl/bxaa034
20. Chen W., Lei H., Qi K. Lattice-based linearly homomorphic signatures in the standard model. *Theoretical Computer Science*. 2016;(634):47–54. doi: 10.1016/j.tcs.2016.04.009
21. Lancichinetti A., Fortunato S. Benchmarks for testing community detection algorithms on directed and weighted graphs with overlapping communities. *Physical Review E*. 2009;(80).

Информация об авторах / Information about the authors

Лейла Айваровна Гамидуллаева

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

Leyla A. Gamidullaeva

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

Алексей Германович Финогеев

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

Aleksey G. Finogeev

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 18.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 28.06.2023

Принята к публикации/Accepted 30.06.2023

ФОРСАЙТ В УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Т. А. Куликова¹, Е. В. Балахонова²

¹ Первый Московский государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения Российской Федерации им. И. М. Сеченова
(Сеченовский университет), Москва, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ kulikova_t_a@staff.sechenov.ru, ² m-a-r-t-a2005@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Отечественная промышленность на протяжении долгого периода времени характеризуется кризисными чертами. В настоящий момент ситуация усугубляется высокой турбулентностью условий внешней среды. На этом фоне согласно поставленным государством задачам необходимо обеспечить устойчивое развитие промышленного сектора в соответствии с вызовами четвертой промышленной революции. Данные обстоятельства вызывают необходимость пересмотра существующих подходов и методов к стратегическому развитию промышленных предприятий и актуализации с учетом современных реалий. *Материалы и методы.* Информационной базой исследования послужили статистические данные, нормативно-правовые документы, аналитические материалы, результаты научных исследований по вопросам управления развитием предприятий. Методологической базой исследования выступили общенаучные методы (метод анализа и синтеза, системный подход, метод индукции и дедукции), библиографический метод, положения теории стратегического менеджмента. *Результаты.* Рассмотрены теоретические аспекты форсайта, проведено сравнение опыта его реализации в различных государствах, обозначена роль и уточнен алгоритм применения в стратегическом управлении на промышленных предприятиях. *Выводы.* Уточненная в исследовании методика форсайта позволит обеспечить большую прозрачность процессов планирования и прогнозирования, поможет в решении актуальных проблем на промышленных предприятиях. Выделенные приоритетные векторы развития предприятий промышленного комплекса могут стать основой форсайт-исследований, проводимых для проектирования образа желаемого будущего и определения путей его создания. Систематизированные автором результаты российских и зарубежных исследователей, оценка практического опыта подтверждают возможность применения методики форсайта к разработке и экономической оценке сценариев развития промышленных предприятий Пензенской области. Методология форсайт-исследований способствует переходу от адаптивного подхода к изменениям внешней среды к конструктивному подходу формирования желаемого образа будущего.

Ключевые слова: форсайт, развитие, промышленность, предприятие

Для цитирования: Куликова Т. А., Балахонова Е. В. Форсайт в управлении развитием промышленных предприятий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 42–61. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-3

FORESIGHT IN INDUSTRIAL ENTERPRISE DEVELOPMENT MANAGEMENT

T.A. Kulikova¹, E.V. Balakhonova²

¹I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare
of the Russian Federation (Sechenovskiy University), Moscow, Russia

²Penza State University, Penza, Russia

¹ kulikova_t_a@staff.sechenov.ru, ² m-a-r-t-a2005@yandex.ru

Abstract. *Background.* Domestic industry has been characterized by crisis features for a long period of time. At the moment, the situation is aggravated by the high turbulence of environmental conditions. Against this background, according to the tasks set by the state, it is necessary to ensure the sustainable development of the industrial sector in accordance with the challenges of the fourth industrial revolution. These circumstances make it necessary to revise existing approaches and methods to the strategic development of industrial enterprises and update them taking into account modern realities. *Materials and methods.* The information base of the study was statistical data, legal documents, analytical materials, the results of scientific research on the management of enterprise development. The methodological basis of the study was general scientific methods (method of analysis and synthesis, system approach, method of induction and deduction), bibliographic method, provisions of the theory of strategic management. *Results.* Theoretical aspects of foresight are considered, the experience of its implementation in different states is compared, the role is indicated and the algorithm of application in strategic management at industrial enterprises is specified. *Conclusions.* The foresight technique refined in the article will ensure greater transparency of planning and forecasting processes, and will help in solving urgent problems at industrial enterprises. The identified priority vectors for the development of enterprises of the industrial complex can become the basis for foresight research conducted to project the image of the desired future and determine ways to create it.

Keywords: foresight, development, industry, enterprise

For citation: Kulikova T.A., Balakhonova E.V. Foresight in industrial enterprise development management. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):42–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-3

Введение

Современные условия хозяйствования отличаются высокой степенью неопределенности, наличием множественности вариантов развития будущего, значительной скоростью обновления технологий, распространением цифровизации, возрастанием угроз экономической безопасности. Между тем необходимо находить компромисс между противостоянием данным негативным факторам и одновременным поиском путей развития промышленных предприятий в соответствии с поставленными государством долгосрочными задачами [1]:

– создание в условиях неопределенности, возрастания угроз экономической безопасности высокотехнологичного и конкурентоспособного промышленного комплекса инновационного типа;

– внедрение роботизированных систем, передовых интеллектуальных и цифровых производственных технологий, подходов к конструированию, систем обработки больших объемов данных, машинного обучения;

- разработка и использование новых типов материалов на фоне истощения сырьевых ресурсов, увеличение доли биоразлагаемых материалов;
- сокращение объема отходов и выбросов в окружающую среду и т.д.

В ответ на выдвинутые правительством задачи обычно прибегают не к развитию промышленности в целом, а к профессиональной переподготовке персонала, созданию новых подразделений, привлечению иностранных инвесторов.

В настоящий момент в российской промышленности остро стоят проблемы, обусловленные недостатком финансирования, разомкнутостью цепочек создания инновационной продукции:

- технологическое отставание от аналогичного производства в ведущих странах мира;
- физическая изношенность основных производственных фондов;
- неудовлетворительная транспортабельность продукции предприятий;
- низкая конкурентоспособность продукции, выпускаемой с использованием энергоемких технологий на устаревшем энергозатратном оборудовании [2];
- недостаточная инновационная активность;
- отсутствие перехода результатов фундаментальных исследований в прикладные, затем в опытно-конструкторские разработки и в промышленную продукцию.

Для вывода промышленности из кризиса необходимы срочные концептуальные изменения и кардинальные сдвиги в реконструкции отрасли, переход к модели инновационного типа, обновление материально-технической базы, адаптация к новым вызовам мировой экономики [3].

Данные обстоятельства вызывают необходимость пересмотра существующих подходов и методов к стратегическому развитию промышленных предприятий. Однако в научной литературе данный вопрос освещен не в полной мере. В основном описываются традиционные методы планирования, но они не позволяют в полной мере учитывать современные реалии и перспективы развития отрасли.

В России прогнозирование в основном диалектично и дедуктивно, а его результаты оказывают слабое влияние на механизм принятия административных решений.

В данных условиях для промышленных предприятий возрастает значение форсайт-исследований как способов определения системы мер для обеспечения инновационного развития, технологических прорывов, способных оказать существенное воздействие на отдельные предприятия и отрасль в целом в средне- и долгосрочном периоде [4].

Особую актуальность форсайт приобретает в условиях цифровой экономики и роста неопределенности [5].

Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [1] стоит задача подготовки страны к еще не получившим широкого общественного признания большим вызовам, прогнозирования и нивелирования рисков, связанных с научно-технологическим развитием. Основная роль в решении данных вопросов возлагается на способствующую возникновению новых знаний и базирующуюся на собственной логике развития фундаментальную науку.

Справиться с проблемой разрыва между научными исследованиями, разработками и использованием их результатов в промышленности, а также

достоверно выявить приоритеты страны в науке и технологиях, поможет метод форсайта.

Обзор литературы

Изучение научных публикаций в области методологии форсайта позволяет сделать вывод о том, что в основном описываются одни и те же методы форсайта:

- качественные (ролевые игры, «дерево целей», интервью, метод сценариев, морфологический и библиометрический анализ и др.);
- количественные (анализ и прогноз индикаторов методов, экстраполяция, моделирование и др.);
- синтетического характера (метод Дельфи, игровое моделирование, построение дорожных карт, патентный анализ, критические технологии и др.) [6].

Однако происходит постоянное расширение методологических разработок в области форсайта.

Так, Курчатовским научным центром в процессе реализации форсайт-проекта предложены не имеющие аналогов методики:

- сценарирование «Неизбежное будущее» дает возможность сформировать варианты развития событий на основе описания «неизбежного и невозможного будущего»;
- средовой анализ – характеристика и прогнозирование сред, внутри которых происходят события, а не «объектов» и «событий»;
- анализ технологического развития «Технологические пакеты» – отслеживание и прогнозирование технологического развития, описание комплексного воздействия технологий на окружающую среду;

– игровое имитационное моделирование используется для проверки на жизнеспособность сценарных гипотез, поиска оригинальных решений, позволяет на основании поведения игроков в соответствии с их ролями и анализа итогов сделать выводы о вариантах развития ситуации и действиях субъектов [7].

Е. К. Шабанова и Т. Ю. Савченко предлагают дополнить форсайт-прогноз на основе экспертных оценок внедрением двухмерного анализа: внешней и внутренней эффективности деятельности предприятия и конкурентоспособности в отрасли промышленности. Результаты дают возможность выделить факторы развития ситуации и различные сценарии будущего [2].

М. Пискайкин отмечает, что точность форсайта может обеспечить создание цифрового двойника – цифровой модели предприятия, отражающей в реальном времени все действующие на предприятии процессы. Цифровой двойник становится базовой моделью для обслуживания предприятия на всех этапах его жизненного цикла и организации работы на принципах «цифровой фабрики» [8].

Как показывает практика, чаще всего в качестве метода форсайт-исследований выбирается Дельфи, который по сравнению с другими способен обеспечить наибольшую формальность, однако в современных реалиях он утрачивает свою актуальность и достоверность.

Согласимся с утверждением Н. В. Гапоненко о том, что необходимо внесение методологических изменений в технологию реализации форсайт-программ. Исполняемые ранее национальные программы форсайта не предоставляли достаточно информации для лиц, принимающих решения, были слишком

масштабными и общими, не учитывали специфики конкретных отраслей. Сегодня наблюдается переориентация от широкомасштабных программ технологического форсайта, в которых Дельфи использовался в качестве инструментария для исследования перспектив развития науки и технологий, к секторальным программам – изучению перспектив развития отдельных секторов науки и технологий (нанотехнологии, биотехнологии, энергетика и т.д.) [9].

Изучение алгоритмов реализации форсайта, отраженных в трудах различных ученых [2, 4, 10–12], показало, что в целом они перекликаются с методологией, отраженной в «Руководстве по стратегическому форсайту» Питера Бишоп, состоящей из пяти основных этапов [13] (рис. 1).



Рис. 1. Основные этапы форсайта [13]

Материалы и методы

Изучение международного опыта стратегического планирования показало, что многие развитые страны добились развития промышленности благодаря использованию методов и инструментов, которые адекватны современному этапу. Одним из них является форсайт.

Рассмотрим особенности и результаты использования форсайта в различных странах (табл. 1) [15].

На основании данных табл. 1 можно отметить, что опыт применения форсайта как действенного инструмента формирования долгосрочных прогнозов, стратегий и приоритетов показателен как в развитых (США, Япония, Великобритания, страны Европы), так и в развивающихся (Бразилия, Индия, Южная Африка, Страны Латинской Америки и Карибского бассейна) странах [13]. Для последних форсайт поможет выделить приоритетные отрасли, в первую очередь требующие средства для инновационной деятельности, тем самым предотвратив необоснованное распределение и так ограниченных ресурсов [22, 24].

Результаты

Для адаптации алгоритма форсайта к применению в стратегическом планировании промышленных предприятий предполагается сделать некоторые уточнения, которые позволят учитывать отраслевую специфику и возрастающую динамичность условий хозяйствования, повысят точность и обоснованность прогнозов, облегчат понимание особенностей реализации форсайта.

Объектом исследования может являться отдельное предприятие или отрасль промышленности.

Таблица 1

Особенности и результаты использования форсайта в странах мира (примеры проектов)

Страна	Особенности реализации форсайта	Примеры проектов	Временной горизонт	Используемые методы	Результаты
1	2	3	4	5	6
Развитые страны					
США	Управленческая технология, направленная на опережающее создание механизмов институционализации инноваций	Определение приоритетов технологического развития	10 лет	Опросы экспертов, экспертные панели	Лидерство в технологическом развитии, применении биотехнологических инноваций
Япония [16]	Регламентирован документом «Внутренняя граница: цели Японии в XXI столетии». Научный и технологический форсайты проводятся каждые 5 лет. Каждая организация составляет собственный план НИОКР с учетом результатов научного и технологического форсайта, проведенного правительством. Социально-инженерная составляющая включена через систему государственного заказа на инновационную деятельность крупных корпораций	Определение проблем технологического развития – технологический форсайт до 2030 г. Выявление приоритетных областей научных исследований	30 лет	Делфи-опрос библиометрический анализ, экспертные панели, сценарии	Концепция развития науки и технологий и механизмы ее реализации, определены сферы науки и технологий, имеющие наибольшее значение для решения глобальных и национальных проблем

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
Страны Европы	Используется повсеместно, предельно формализован и предметен, не включает прогностический элемент, а воспринимается как мнение элит о будущем. Частные экспертные позиции обобщаются в виде содержательных принципов	Определение критических технологий и конкурентных преимуществ (Франция) Разработка стратегического видения для Министерства образования и науки (Германия)	5 лет	Экспертная оценка	Перечень 119 ключевых технологий
			20 лет	Семинары, сценарии, экспертные панели, открытые дискуссии, онлайн-опросы	Стратегические направления развития. Приоритеты для исследовательских программ
		Определение технологических приоритетов, направлений правового регулирования и государственной политики (Венгрия)	15–20 лет	Диагностические исследования, делфи-опросы, макросценарии, семинары	Создание и укрепление горизонтальных взаимосвязей наука-образование-бизнес
Великобритания	Проводится с целью помочь правительству выбрать правильные ориентиры научно-технической политики	Усиление инновационного потенциала науки, обеспечение стабильного развития	10–20 лет	Семинары, сценарии, экспертные панели, открытые дискуссии, сканирование технологий, Банк знаний	Концентрация ресурсов на практическом использовании научных результатов. Поддержка национальной инновационной системы

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
Китай [17, 18]	Пошаговое использование комплексного форсайта. Начинается с поиска и реализации в продукте технологий, востребованных преимущественно не сегодня, а завтра. Проводится с целью мониторинга мировых технических и технологических тенденций развития перспективных отраслей, привлечения правительством частных компаний или научно-исследовательских лабораторий для осуществления ключевых проектов по разработке технологий искусственного интеллекта следующего поколения	Оценка будущего научной и инновационной деятельности в Китае до 2025 г. Омоложение и укрепление высокотехнологичных производителей страны. Создание цифрового общества [19]	10 лет	Дельфи, сценарии, медиасканирование, краудсорсинг и кросс-факторный анализ	Выявлены значительные внутренние резервы для развития. Укрепление технологической независимости производителей. Смена негативного производственного имиджа страны, составлены четыре вероятных сценария инновационного развития, характеризующие состояние и приоритеты науки
Канада [19]	Предполагает определение приоритетных направлений научно-технологического прогресса, пересмотр, корректировку задач в области инноваций	Определение новых драйверов и толчков к развитию национальной инновационной системы. Проект «Обновление»	15 лет	Экспертные панели, «фьючерсные» семинары, технологические дорожные карты, обзор литературы	Выявлены перспективы и стратегические направления инновационного развития

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
Развивающиеся страны					
Бразилия [20]	Раздвоение между нерегулярностью и институционализацией исследований, которые должны стать частью процесса планирования и принятия решений. Инструмент выработки государственной научно-технологической и инновационной политики для различных секторов и цепочек создания стоимости, программы создания перспективных промышленных технологий	Форсайт-проект «Бразилия 2020»	10–13 лет	Дельфи-опросы, сценарии, диагностика, изучение литературы и глубинный анализ текстов, экспертные панели, веб-Дельфи	Определение рекомендаций в 17 тематических областях
Индия	Полный цикл форсайт-сессий реализуется централизованными подразделениями. Направлен на побуждение к новым диалогам между обществом и высшими чиновниками на предмет будущего страны [15]	«Видение технологий 2020». Обеспечение инструкциями для создания национальных инициатив в области науки и техники, а также инвестиционного плана	25 лет	Экспертные панели, сценарии, обзор литературы, экстраполяция трендов [21]	Инвестиционный план, разработка интегрированной политики в области науки и техники на государственном и национальном уровнях

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Южная Африка	Один из инструментов национальной научно-технологической политики, осуществляется нерегулярно и не имеет институциональной основы. Правительственные департаменты могут передавать частным компаниям проекты по форсайту	Актуализация технологических приоритетов. Вовлечение в управление процессом промышленных, правительственных учреждений, всех слоев общества	8–10 лет	Опрос экспертов, обзор литературы [22]	Разработка определенных национальных стратегий в области биотехнологий обеспечила развитие производства. Перечень перспективных технологий
Страны Латинской Америки и Карибского бассейна [23]	Применяется на уровне регионов в различных сферах, включающих хозяйство агропромышленного комплекса и производство продуктов питания, информационно-коммуникационные технологии и современное изменение климата	Определение первоочередных стратегических целей, главным образом для решения проблемы «цифрового неравенства»	5–10 лет	Экспертные панели, обзор литературы, сценарии, Дельфи [15]	Национальный исследовательский и технологический форсайт. Учреждение форсайта для сельского хозяйства, продовольственной безопасности и научных исследований

В отраженном на рис. 1 алгоритме предлагается отдельно выделить этапы префорсайта и постфорсайта, планирования затрат на форсайт, риск-менеджмента [6, 10, 11] (рис. 2).

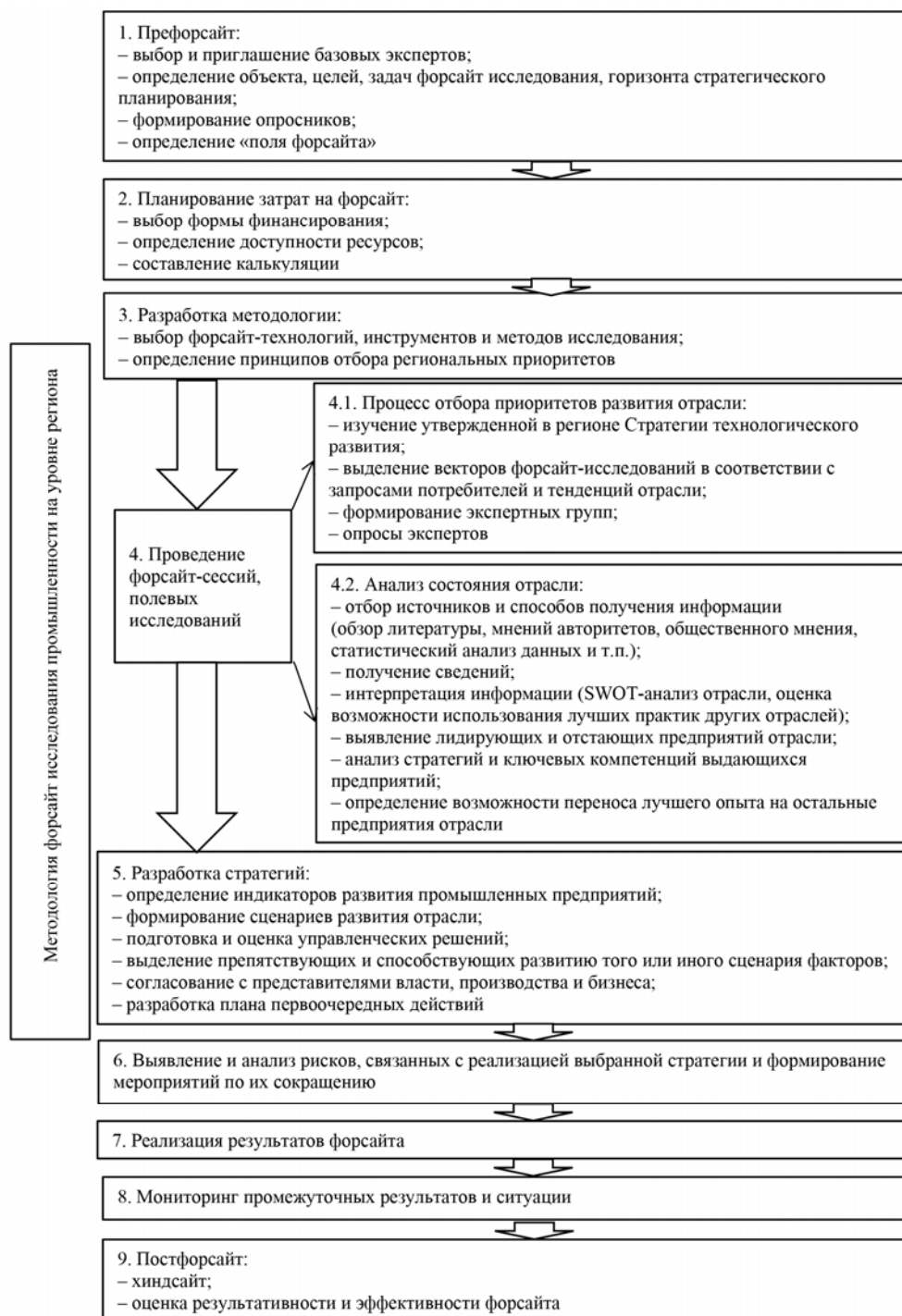


Рис. 2. Методология форсайт-исследования промышленности на уровне региона

Префорсайт предполагает привлечение небольшого числа экспертов и проводится с целью уточнения направления развития форсайта – области исследования и анализа, а также определения целевой аудитории, областей, из которых будут привлечены эксперты [25].

На предварительном этапе целесообразно поручить экспертам базовой группы не отвечать на представленные вопросы, а подготовить будущий экспертный опрос:

- сгруппировать совокупность представленных вопросов по логике обсуждения, темам и внутри них;
- выявить неосвещенные темы;
- убрать бесполезные и добавить при необходимости новые вопросы;
- выявить вопросы, которые целесообразно разделить на несколько;
- переформулировать в случае целесообразности вопросы, особенно те, на которые уже подразумевается ответ [26].

Для определения структуры и состава экспертов, приглашаемых к форсайт-исследованиям, обратим внимание на так называемое «поле форсайта» (рис. 3).

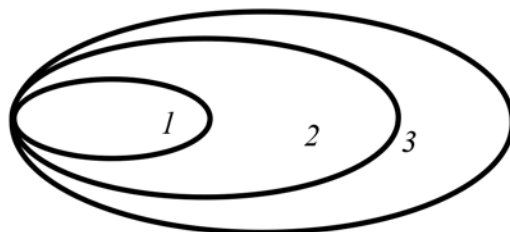


Рис. 3. Поле форсайта

При реализации форсайта в промышленности в каждый из кругов поля предполагается включить следующих субъектов:

1. Бизнесмены, представители администрации, ученые из вузов, специалисты в области инновационной деятельности, т.е. инициаторы, имеющие интерес в этом форсайте и финансирующие его проведение.

2. Производители традиционных видов продукции, представители Законодательного Собрания и Администрации региона, ученые, осуществляющие только фундаментальные исследования – граждане и организации, ощущающие воздействие назревающих изменений, но не принимающие активного участия в их реализации.

3. Производители и население региона – субъекты, которые не всегда понимают вероятность будущих изменений, так как они оказывают только частичное воздействие и преобразованиями не интересуются.

Важным этапом выступает планирование затрат на форсайт:

- финансирование команды, ведущей проект;
- осуществление командировок, встреч, собраний и иных мероприятий;
- информационное обеспечение и рекламные материалы;
- осуществление масштабных исследований, консультаций, опросов общественного мнения;
- сопутствующие необходимые виды деятельности;
- налоговые платежи [27].

Величина затрат на форсайт, как правило, определяется решаемыми задачами и местом проведения исследований.

В качестве отдельной задачи форсайта можно обозначить выделение препятствующих и способствующих развитию того или иного сценария факторов. При этом определенное заранее наиболее вероятное и желаемое будущее будет сливаться в цельный образ при проведении каждого последующего экспертного опроса [26].

Можно говорить о большом количестве индикаторов развития промышленных предприятий, однако целесообразней выделить несколько ключевых показателей (до четырех), улучшение которых кардинально скажется на ситуации. Именно для ключевых показателей следует применить инструментарий форсайта [27].

Постфорсайт предполагает оценку результативности выполненного форсайта и планирование дальнейшей итерации форсайт-проекта. Для ее реализации может быть использован инструмент хиндсайт – оценка провалившихся в прошлом проектов, анализ причин их провала с целью недопущения данных ошибок в будущем [28].

Об эффективности использования форсайта можно говорить в случае, когда увеличение прибыльности отрасли или предприятия будет стремиться к максимуму, а производственные издержки – к минимальному значению [2].

Обсуждение и выводы

В статье в качестве инструмента определения задач долгосрочного развития организаций и способов их реализации рассматривается метод форсайта. В результате проведенного исследования был уточнен алгоритм форсайта применительно к управлению развитием промышленных предприятий с учетом отраслевой специфики, современных вызовов в экономике, промышленности и обществе, обусловленных формированием и развитием цифровой экономики и Индустрии 4.0 [29].

Разработка стратегии промышленности на основе форсайта обеспечивает согласование мнений и задач государства, бизнеса относительно приоритетов развития и долгосрочных целей отрасли, которые становятся базой для разработки планов на уровне отдельных предприятий.

Изучение трудов в области стратегического планирования позволило определить круг проблем и задач, выделяемых различными исследователями, при решении которых целесообразно применять технологию форсайта.

Согласие с нашей позицией можно обнаружить в работе Л. И. Власюк, где подчеркивается важность совершенствования стратегического планирования на региональном уровне и отмечается, что одно или несколько крупных предприятий определяют тренд регионального развития. В связи с этим при стратегическом планировании региона нельзя руководствоваться только общероссийскими задачами и трендами, ключевую роль следует отвести учету региональных факторов и мнений, объективных ограничений, связанных с природными, географическими и климатическими условиями, ресурсной обеспеченностью, что и подразумевается в рамках форсайта [30].

О необходимости сопряжения отраслевого и регионального аспектов научно-технологической и промышленной политики в системе государственного стратегического планирования говорят В. Филатов, В. Доржиева.

Форсайт-технологии целесообразно применять в государственном долгосрочном прогнозировании при разработке прогнозов технологического и инновационного развития отраслей. При этом подразумевается приглашение экспертов именно из того региона, где проводится акт стратегического планирования. Они наилучшим образом осведомлены о региональных особенностях развития промышленности, проблемах и перспективах.

С. М. Мирзоева в качестве показателей эффективности развития промышленного предприятия называет устойчивое положение на рынке, быструю адаптацию к динамичным условиям внешней среды, осуществление инновационной деятельности. Использование форсайта в стратегическом планировании позволит обеспечить данные параметры [31].

А. А. Акимов отмечает, что в отличие от директивного и программно-целевого планирования, стратегическое базируется на перераспределении ресурсов для изменения особенностей и тенденций развития объекта [32]. Форсайт также подразумевает, что будущее творимо и зависит от принимаемых сегодня управленческих решений.

Д. А. Плеханов, С. М. Заверский, Н. М. Чуркина отмечают ряд недостатков в системе стратегического планирования нашей страны, для нивелирования которых также можно предложить использовать форсайт.

Формирование отраслевых документов в области стратегического планирования начинается только после издания соответствующего правительственного поручения, что происходит редко. К тому же отраженная в отраслевых стратегиях информация не содержит подробного плана мероприятий, не обеспечивает возможность целостного понимания иницилируемой государством политики развития промышленности.

Л. А. Аносова, Л. С. Кабир также отмечают заниженные требования к формулируемой цели, приводящие к низким показателям развития отраслей. При этом недостаточно проработан вопрос учета рисков и угроз развития отрасли [33].

В. Филатов, В. Доржиева добавляют, что в подобных документах сформулированы только основные цели и задачи формирования современной научно-технологической и промышленной политики, поэтому отсутствует возможность оперативно учитывать новые вызовы хозяйственной среды и четко определенные векторы развития, точные значения показателей, достижение которых требуется от отдельных предприятий.

Форсайт даст возможность, не дожидаясь указаний свыше, определить динамику факторов, влияющих на отрасль, различные сценарии будущего и наиболее эффективные пути развития промышленных предприятий. Предполагается дифференциация целевых показателей с учетом специфики деятельности отдельных предприятий, что увеличит легкость и вероятность их выполнения.

Формирование широкого «поля форсайта» позволит нивелировать недостаток, связанный с тем, что к разработке стратегических отраслевых документов, как правило, привлекается ограниченный круг экспертов, порядок взаимодействия с экспертным сообществом и бизнесом не регламентируется и носит формальный или закрытый характер.

Д. А. Плеханов, С. М. Заверский, Н. М. Чуркина выделяют недостатки в механизме мониторинга и контроля: установление глобальных стратегических целей, не привязанных к конкретным действиям, и слишком общих целевых

показателей, не дающих возможность провести мониторинг реализации стратегии.

А. Л. Богданова также пишет о необходимости установления опережающих индикаторов как инструмента прогнозирования экономической динамики. Исследователь отмечает наличие широкого разнообразия данных индикаторов, которые не всегда адекватны и целесообразны к использованию при решении локальных задач [34].

Форсайт обеспечит возможность наладить механизм мониторинга и контроля, так как не завершается только формированием задач, а предполагает непрерывный процесс отслеживания состояния отрасли, соответствия направлений движений предприятий лучшим сценариям. Форсайт является универсальным и многофункциональным инструментом определения эффективности функционирования предприятий на основе оптимального количества обоснованно установленных конкретных индикаторов, в том числе в условиях кризиса и ограниченности информации. При этом обеспечивается учет мнений всех участников «поля форсайта» [35].

Л. Г. Ворона-Сливинская отмечает, что малые предприятия имеют значительный резерв роста, высокий уровень мобильности и степени адаптации к изменениям факторов внешней среды, поэтому они могут выступать драйвером развития промышленности на региональном уровне [36]. В одиночку небольшим организациям сложно организовать и провести комплексные и масштабные исследования, привлечь широкий круг экспертов, а проводимые форсайт-исследования на уровне региона могут стать информационной базой при принятии стратегических решений. Применение технологии форсайта также позволит повысить достоверность сценариев, разрабатываемых малыми предприятиями.

Форсайт поможет в реализации кластерной политики, о важности которой также упоминают В. Филатов, В. Доржиева посредством разработки программ развития отраслевых кластеров и поддержки их реализации на основе изучения и согласования мнений государства, бизнеса, науки, общества [37].

Н. П. Виноградова, А. А. Попова, А. Н. Попов отмечают, что стратегическое планирование направлено не на достижение прибыльного и рационального расходования ресурсов хозяйствующего субъекта, а на повышение конкурентоспособности, одним из способов которого и является инновационное развитие. При этом важна и опережающая реакция стратегического планирования на внешние изменения, определяемая установлением целевых ориентиров, многоэтапностью распределения ресурсов и искусством соединения различных видов плановой деятельности (включая текущую и оперативную). Инновационная стратегия реализуется посредством прогрессивных управленческих решений, принимаемых с учетом оценки их рисков как в краткосрочной, так и отдаленной перспективе. Достигнуть этого поможет форсайт, так как велика вероятность, что из широкого числа экспертов кто-то выскажет нестандартные мнения, которые будут учтены [38].

Н. И. Бабкина подчеркивает, что формирование стратегии становится жизненно необходимым в тех случаях, когда возникают внезапные изменения во внешней среде предприятия, а в настоящий момент степень и динамика неопределенности колоссально возрастают. В основе разработки стратегических планов – анализ перспектив развития предприятия при определенных предположениях об изменении его внешней среды, а также определение его позиций

в конкурентной борьбе за рынки сбыта своей продукции [39]. Помочь получить достоверную оценку и найти оригинальный подход к решению проблем может совокупность экспертных мнений, собираемых в процессе форсайта.

Базовые принципы форсайта адекватны путям действий организаций в условиях неопределенности. Будущее нельзя точно спрогнозировать или предсказать. К нему можно быть готовым, оно определяется усилиями и решениями, которые будут предприняты сегодня [6].

Использование форсайта в отрасли промышленности и на отдельных предприятиях позволит прояснить перспективы, своевременно выявить потенциальные возможности, снизить риски и добиться большего соответствия инновационной политики общему состоянию и ожиданиям рынка, повысить гибкость реагирования на угрозы в области экономической безопасности.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на решение задачи снижения субъективизма форсайта. Для этого его инструменты целесообразно оценить с точки зрения обеспечения точности результата.

Список литературы

1. Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : [с изм. на 15 марта 2021 г.]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420384257> (дата обращения: 20.05.2023).
2. Шибанова Е. К., Савченко Т. Ю. Форсайт-прогнозирование как конструктор «эффективности будущего» деятельности предприятий // Социум и власть. 2018. № 3. С. 52–63.
3. Шепетовская В. И., Воротников А. М., Фадеева М. Л. Эффективная инновационная деятельность как залог устойчивого развития России // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 16–35.
4. Ибрагимова Р. С., Головкин Д. С. Оценка экономического потенциала текстильной промышленности на основе концепции Foresight // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 4. С. 128–139.
5. Луценко С. И. Форсайт: востребованность в цифровой эре // Цифровая экономика. 2019. № 4. С. 35–39.
6. Миронова Д. Ю., Баранов И. В., Помазкова Е. Е., Румянцева О. Н. Управление проектной деятельностью: применение форсайта и промышленного симбиоза в управлении проектами в целях устойчивого развития. СПб. : Университет ИТМО, 2022. 95 с.
7. Мешкова Н. В., Козлов В. А., Третьяк В. П. Состояние форсайт-исследований в России. URL: http://www.virtass.ru/admin/pics/24_01_IO.pdf (дата обращения: 20.05.2023).
8. Промышленность-2020: приглашение к форсайту. Часть 2. URL: <https://controlengrussia.com/epcm/forsajt-2020/> (дата обращения: 20.05.2023).
9. Гапоненко Н. В. Форсайт. Теория. Методология. Опыт : монография. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2008. 239 с.
10. Соколов А. В. Форсайт: взгляд в будущее // Форсайт. 2007. № 1. С. 8–15.
11. Афанасьев М. М. Совершенствование методологии форсайта как инструмента стратегического развития промышленных регионов и отраслей // Российское предпринимательство. 2017. Т. 18, № 17. С. 2481–2490. URL: <https://creativeconomy.ru/lib/38269> (дата обращения: 20.05.2023).
12. Карасев О. И., Вишневецкий К. О., Веселитская Н. Н. Применение методов Форсайта для выявления приоритетов технологического развития авиационно-промышленного комплекса // Труды МАИ. 2012. № 53. С. 1–16.
13. Мельников В. В. Форсайт как инструмент стратегического планирования развития промышленности // Государственное и муниципальное управление в XXI веке: теория, методология, практика. 2015. № 19. С. 103–107.

14. Малиновская О. В., Скобелева И. П. Форсайт как технология стратегического планирования и управления // Инновационное развитие. 2014. № 4. С. 44–55.
15. Форсайт как инструмент стратегического долгосрочного планирования для развивающихся стран. С. 6–8. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/GPCSE_Foresight_RUS.pdf (дата обращения: 20.05.2023).
16. Применение технологических форсайтов для определения будущих потребностей в компетенциях : материалы междунар. семинара СКОЛКОВО и МОТ. Женева : МОТ, 2014. 142 с.
17. Christofilopoulos E., Mantzanakis S. China 2025: Research & Innovation Landscape // Foresight and STI Governance. 2016. Vol. 10, № 3. P. 7–16.
18. Захаров М. Ю. Социокультурная традиция и цифровое общество: два стратегических ориентира китайского форсайта // Вестник университета. 2021. № 2. С. 159–165.
19. Крюков С. В. Форсайт: от прогноза к формированию будущего // Terra Economicus. 2010. Т. 8, № 3. Ч. 2. С. 7–17.
20. Cagnin C. STI Foresight in Brazil // Foresight-Russia. 2014. Vol. 8, № 2. P. 46–55.
21. Гарнов А. П., Горохова И. В. Форсайт: сотрудничество государства и бизнеса в создании конкурентоспособных инноваций и стратегий // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2012. № 8. С. 9–18.
22. Pouris A., Raphasha P. Priorities Setting with Foresight in South Africa // Foresight and STI Governance. 2015. Vol. 9, № 3. P. 66–79.
23. Пенькова И. В., Боднар А. В. Теоретические основы форсайта в парадигме стратегического управления и инновационного развития // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Экономика и управление. 2017. № 3. С. 50–58.
24. Григорьева Е. Э. Экономические проблемы регионов и отраслевых комплексов // Проблемы современной экономики. 2014. № 4. С. 271–274.
25. Что такое форсайт и как его проводить. URL: <https://huntflow.ru/blog/pozolotichku/> (дата обращения: 20.05.2023).
26. Воронов Ю. П. Форсайт как инструмент / под ред. В. И. Суслова. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2010. 212 с.
27. Терешина Н. П., Третьяк В. П., Метелкин П. В. Форсайт технологии : учеб. пособие. М. : РУТ (МИИТ), 2019. 179 с.
28. Моргунов Е. В. Метод «Форсайт» и его роль в управлении технологическим развитием страны // Проблемы развития рыночной экономики / под ред. член.-корр. РАН В. А. Цветкова. М. : ЦЭМИ РАН, 2011. С. 97–113.
29. Цифровая экономика и Индустрия 4.0: форсайт Россия : сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием (26–28 марта 2020 г.) : в 2 т. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. Т. 1. 467 с.
30. Власюк Л. И. Региональная проекция системы стратегического планирования и прогнозирования в Российской Федерации. Экономика промышленности // Russian Journal of Industrial Economics. 2017. № 10. С. 107–113.
31. Мирзоева С. М. Особенности стратегического планирования промышленных предприятий // Экономика и предпринимательство. 2015. № 3. URL: <https://naukarus.com/osobennosti-strategicheskogo-planirovaniya-promyshlennyh-predpriyatiy> (дата обращения: 20.05.2023).
32. Акимов А. А. Особенности стратегического планирования на предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. 2017. № 1. 149–156.
33. Аносова Л. А., Кабир Л. С. Отраслевое стратегическое планирование: особенности современного этапа // Экономика и управление. 2020. № 26. С. 678–697.
34. Богданова А. Л. Опережающие показатели – инструмент экономического прогнозирования // Экономическая наука современной России. 2018. № 2. С. 35–56.
35. Плеханов Д. А., Заверский С. М., Чуркина Н. М. Особенности стратегического планирования: на примере стратегии развития автомобильной промышленности // Российское предпринимательство. 2015. № 16. С. 4375–4392.

36. Ворона-Сливинская Л. Г. Проблемы конкурентоспособности в современной экономике // Проблемы современной экономики. 2008. № 2. URL: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2011> (дата обращения: 20.05.2023).
37. Филатов В., Доржиева В. Стратегическое планирование как инструмент обеспечения устойчивого научно-технологического и промышленного развития регионов // Федерализм. 2018. № 4. С. 153–168.
38. Виноградова Н. П., Попова А. А., Попов А. Н. Экономика делового успеха : учеб. пособие. М. : Академия Естествознания, 2017. 252 с.
39. Бабкина Н. И. Этапы и особенности стратегического управления развитием промышленного предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2013. № 1. С. 73–81.

References

1. *Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii: [s izm. na 15 marta 2021 g.] = Strategies of scientific and technological development of the Russian Federation [as amended on March 15, 2021].* (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420384257> (accessed 20.05.2023).
2. Shibanova E.K., Savchenko T.Yu. Foresight-forecasting as a constructor of the "efficiency of the future" of enterprises. *Sotsium i vlast' = Society and power*. 2018;(3): 52–63. (In Russ.)
3. Shepetovskaya V.I., Vorotnikov A.M., Fadeeva M.L. Effective innovative activity as a guarantee of sustainable development of Russia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):16–35. (In Russ.)
4. Ibragimova R.S., Golovkin D.S. Assessment of the economic potential of the textile industry based on the Foresight concept. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern high-tech technologies. Regional application*. 2018;(4): 128–139. (In Russ.)
5. Lutsenko S.I. Foresight: demand in the digital era. *Tsifrovaya ekonomika = Digital Economy*. 2019;(4):35–39. (In Russ.)
6. Mironova D.Yu., Baranov I.V., Pomazkova E.E., Rumyantseva O.N. *Upravlenie proektnoy deyatel'nost'yu: primeneniye forsayta i promyshlennogo simbioza v upravlenii proektami v tselyakh ustoychivogo razvitiya = Project management: Application of Foresight and industrial Symbiosis in project management for sustainable development*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2022:95. (In Russ.)
7. Meshkova N.V., Kozlov V.A., Tret'yak V.P. *Sostoyaniye forsayt-issledovaniy v Rossii = The state of foresight research in Russia*. (In Russ.). Available at: http://www.virtass.ru/admin/pics/24_01_IO.pdf (accessed 20.05.2023).
8. *Promyshlennost'-2020: priglaseniye k forsaytu. Chast' 2 = Industry 2020: invitation to foresight. Part 2*. (In Russ.). Available at: <https://controlengrussia.com/epcm/forsajt-2020/> (accessed 20.05.2023).
9. Gaponenko N.V. *Forsayt. Teoriya. Metodologiya. Opyt: monografiya = Foresight. Theory. Methodology. Experience : monograph*. Moscow: YuNITI-DANA, 2008:239. (In Russ.)
10. Sokolov A.V. Foresight: a look into the future. *Forsayt = Foresight*. 2007;(1):8–15. (In Russ.)
11. Afanas'ev M.M. Improving foresight methodology as a tool for strategic development of industrial regions and industries. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo = Russian entrepreneurship*. 2017;18(17):2481–2490. (In Russ.). Available at: <https://creativeconomy.ru/lib/38269> (accessed 20.05.2023).
12. Karasev O.I., Vishnevskiy K.O., Veselitskaya N.N. Application of Foresight methods to identify priorities of technological development of the aviation-industrial complex. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2012;(53):1–16. (In Russ.)

13. Mel'nikov V.V. Foresight as a tool for strategic planning of industrial development. *Gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie v XXI veke: teoriya, metodologiya, praktika* = *State and municipal management in the XXI century: theory, methodology, practice*. 2015;(19):103–107. (In Russ.)
14. Malinovskaya O.V., Skobeleva I.P. Foresight as a technology of strategic planning and management. *Innovatsionnoe razvitie* = *Innovative development*. 2014;(4):44–55. (In Russ.)
15. *Forsayt kak instrument strategicheskogo dolgosrochnogo planirovaniya dlya razvivayushchikhsya stran* = *Foresight as a strategic long-term planning tool for developing countries*. P. 6–8. (In Russ.). Available at: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/GPCSE_Foresight_RUS.pdf (accessed 20.05.2023).
16. *Primenenie tekhnologicheskikh forsaytov dlya opredeleniya budushchikh potrebnostey v kompetentsiyakh: materialy mezhdunar. seminarov SKOLKOVO i MOT* = *Application of technological foresight to determine future competence needs : materials of the International SKOLKOVO and ILO seminars*. Zheneva: MOT, 2014:142. (In Russ.)
17. Christofilopoulos E., Mantzanakis S. China 2025: Research & Innovation Landscape. *Foresight and STI Governance*. 2016;10(3). P. 7–16.
18. Zakharov M.Yu. Sociocultural tradition and Digital Society: Two strategic landmarks of Chinese Foresight. *Vestnik universiteta* = *Bulletin of the University*. 2021;(2): 159–165. (In Russ.)
19. Kryukov S.V. Foresight: from the forecast to the formation of the future. *Terra Economicus*. 2010;8(3):7–17. (In Russ.)
20. Cagnin C. STI Foresight in Brazil. *Foresight-Russia*. 2014;8(2):46–55.
21. Garnov A.P., Gorokhova I.V. Foresight: cooperation of the state and business in the creation of competitive innovations and strategies. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova* = *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2012;(8):9–18. (In Russ.)
22. Pouris A., Raphasha P. Priorities Setting with Foresight in South Africa. *Foresight and STI Governance*. 2015;9(3):66–79.
23. Pen'kova I.V., Bodnar A.V. Theoretical foundations of foresight in the paradigm of strategic management and innovative development. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika i upravlenie* = *Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: Economics and Management*. 2017;(3):50–58. (In Russ.)
24. Grigor'eva E.E. Economic problems of regions and industry complexes. *Problemy sovremennoy ekonomiki* = *Problems of modern economy*. 2014;(4):271–274. (In Russ.)
25. *Chto takoe forsayt i kak ego provodit'* = *What is foresight and how to conduct it*. (In Russ.). Available at: <https://huntflow.ru/blog/pozoloti-ruchku/> (accessed 20.05.2023).
26. Voronov Yu.P. *Forsayt kak instrument* = *Foresight as a tool*. Novosibirsk: IEOPP SO RAN, 2010:212. (In Russ.)
27. Tereshina N.P., Tret'yak V.P., Metelkin P.V. *Forsayt tekhnologii: ucheb. posobie* = *Foresight technologies : a textbook*. Moscow: RUT (MIIT), 2019:179. (In Russ.)
28. Morgunov E.V. The Foresight method and its role in the management of technological development of the country. *Problemy razvitiya rynochnoy ekonomiki* = *Problems of market economy development*. Moscow: TsEMI RAN, 2011:97–113. (In Russ.)
29. *Tsifrovaya ekonomika i Industriya 4.0: forsayt Rossiya: sb. tr. nauch.-prakt. konf. s zarubezhnym uchastiem (26–28 marta 2020 g.): v 2 t.* = *Digital Economy and Industry 4.0: Foresight Russia : collection of works of scientific and practical conf. with foreign participation (March 26–28, 2020) : in 2 vols*. Saint Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2020;1:467. (In Russ.)
30. Vlasyuk L.I. Regional projection of the strategic planning and forecasting system in the Russian Federation. *Economics of Industry. Russian Journal of Industrial Economics*. 2017;(10):107–113. (In Russ.)
31. Mirzoeva S.M. Features of strategic planning of industrial enterprises. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* = *Economics and entrepreneurship*. 2015;(3). (In Russ.). Available at: <https://naukarus.com/osobennosti-strategicheskogo-planirovaniya-promyshlennyh-predpriyatiy> (accessed 20.05.2023).

32. Akimov A.A. Features of strategic planning at enterprises of the military-industrial complex. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Social sciences.* 2017;(1):149–156. (In Russ.)
33. Anosova L.A., Kabir L.S. Sectoral strategic planning: features of the modern stage. *Ekonomika i upravlenie = Economics and management.* 2020;(26):678–697. (In Russ.)
34. Bogdanova A.L. Leading indicators – an economic forecasting tool. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii = Economic science of modern Russia.* 2018;(2):35–56. (In Russ.)
35. Plekhanov D.A., Zaverskiy S.M., Churkina N.M. Features of strategic planning: on the example of the development strategy of the automotive industry. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo = Russian entrepreneurship.* 2015;(16):4375–4392. (In Russ.)
36. Vorona-Slivinskaya L.G. Problems of competitiveness in the modern economy. *Problemy sovremennoy ekonomiki = Problems of modern economics.* 2008;(2). (In Russ.). Available at: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2011> (accessed 20.05.2023).
37. Filatov V., Dorzhieva V. Strategic planning as a tool for ensuring sustainable scientific, technological and industrial development of regions. *Federalizm = Federalism.* 2018;(4):153–168. (In Russ.)
38. Vinogradova N.P., Popova A.A., Popov A.N. *Ekonomika delovogo uspekha: ucheb. posobie = Economics of business success : textbook.* Moscow: Akademiya Estestvoznaniya, 2017:252. (In Russ.)
39. Babkina N.I. Stages and features of strategic management of industrial enterprise development. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki = Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences.* 2013;(1):73–81. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Андреевна Куликова

кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономики
и менеджмента,
Первый Московский государственный
медицинский университет
Министерства здравоохранения
Российской Федерации
имени И. М. Сеченова
(Сеченовский университет)
(Россия, г. Москва,
Большая Пироговская ул., 2, стр. 4)
E-mail: kulikova_t_a@staff.sechenov.ru

Tatyana A. Kulikova

Candidate of economical sciences,
associate professor of the sub-department
of economics and management,
I.M. Sechenov First Moscow State Medical
University of the Ministry of Healthcare
of the Russian Federation (Sechenovskiy
University)
(build. 4, 2 Bolshaya Pirogovskaya street,
Moscow, Russia)

Елена Викторовна Балахонова

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

Elena V. Balakhonova

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

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

Поступила в редакцию/Received 16.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 12.04.2023

Принята к публикации/Accepted 18.04.2023

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ РАЗВИТИЯ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАМКАХ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ РОССИИ

Н. В. Некрылова¹, И. Г. Хохлова², Т. В. Кузнецова³

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

¹nina-nekrylova@yandex.ru, ²Irina_khokhlova@inbox.ru, ³t.v.kuznetsova.penza@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Изменившаяся макроэкономическая ситуация в значительной мере актуализирует проблему стимулирования экономического развития регионов и рационального распределения ограниченных бюджетных средств на реализацию региональных проектов России. *Материалы и методы.* Для оценки эффективности распределения средств между региональными проектами использованы методы экономико-статистического анализа, а также предложен метод матричной экспресс-оценки эффективности региональных программ на основе сравнения темпов роста объемов финансирования реализации проектов и показателей их эффективности. *Результаты.* Предложенный метод экспресс-оценки позволил классифицировать региональные проекты области на четыре группы и выявить проекты, требующие особого внимания при распределении бюджетных средств, а также недофинансированные (условно эффективные) и перефинансированные (условно неэффективные) проекты. *Выводы.* Предлагаемый подход позволяет на этапе предварительного анализа оперативно классифицировать региональные проекты и выделять недостаточно эффективные, требующие дополнительного анализа расходования бюджетных средств на их реализацию.

Ключевые слова: региональные программы, национальные проекты, экспресс-оценка, эффективность, матрица, структурные сдвиги, темп роста, индикатор

Для цитирования: Некрылова Н. В., Хохлова И. Г., Кузнецова Т. В. Экспресс-оценка эффективности региональных программ развития Пензенской области в рамках национальных проектов России // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 62–76. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-4

EXPRESS ASSESSMENT OF THE REGIONAL DEVELOPMENT PROGRAMS EFFECTIVENESS IMPLEMENTED WITHIN THE FRAMEWORK OF NATIONAL PROJECTS OF RUSSIA, ON THE EXAMPLE OF PROGRAMS OF THE PENZA REGION

N.V. Nekrylova¹, I.G. Khokhlova², T.V. Kuznetsova³

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

¹nina-nekrylova@yandex.ru, ²Irina_khokhlova@inbox.ru, ³t.v.kuznetsova.penza@yandex.ru

Abstract. *Background.* The changed macroeconomic situation largely actualizes the problem of stimulating the economic development of regions and the rational allocation of

© Некрылова Н. В., Хохлова И. Г., Кузнецова Т. В., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

limited budget funds for the implementation of regional projects in Russia. *Materials and methods.* To assess the effectiveness of the distribution of funds between regional projects, methods of economic and statistical analysis were used, and a method of matrix express evaluation of the effectiveness of regional programs based on a comparison of the growth rates of project financing and indicators of their effectiveness was proposed. *Results.* The proposed method of rapid assessment made it possible to classify regional projects of the region into 4 groups and identify projects that require special attention when allocating budget funds, as well as underfunded (conditionally effective) and overfinanced (conditionally inefficient) projects. *Conclusions.* The proposed approach makes it possible at the stage of preliminary analysis to quickly classify.

Keywords: regional programs, national projects, rapid assessment, efficiency, matrix, structural shifts, growth rate, indicator

For citation: Nekrylova N.V., Khokhlova I.G., Kuznetsova T.V. Express assessment of the regional development programs effectiveness implemented within the framework of national projects of Russia, on the example of programs of the Penza region. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):62–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-4

Введение

Современные социальные и экономические условия ставят новые вызовы перед экономикой России и в значительной степени актуализируют проблемы стимулирования экономического развития регионов и рационального расходования бюджетных средств. Чем выше эффективность распоряжения бюджетными ресурсами, тем больше создается возможностей для ускоренного развития территории, повышения производительности труда, создания высокотехнологичных производств и цифровизации отраслей экономики.

Реализация опережающего социально-экономического развития региона и обеспечение его долгосрочной стратегической конкурентоспособности заложены в качестве приоритетов в программах регионального развития, финансируемых средствами государственного бюджета и внебюджетными ресурсами, в том числе в рамках выполнения национальных и федеральных проектов общероссийского масштаба.

В основе стратегического развития экономики Российской Федерации лежит программно-целевой подход, особенности реализации которого исследуются в трудах Е. Ю. Волковой [1], А. В. Минакова, С. Б. Лапиной [2], А. С. Шпак, М. А. Амировой [3], Е. И. Середы [4], Т. А. Шабалиной [5], и подчеркивается, что существующие методики программно-целевого управления на уровне субъектов России не всегда универсальны и отражают специфику различных сфер деятельности общества. Особую сложность в использовании программно-целевого подхода при планировании региональных программ представляет оценка эффективности их реализации.

Е. А. Федченко и А. О. Бурякова [6] обращают внимание на то, что помимо общей Методики оценки эффективности реализации государственных программ, утвержденной Постановлением Правительства РФ № 903 от 17 июля 2019 г. [7], регионы могут самостоятельно разрабатывать методики оценки их эффективности.

Оценка эффективности государственных программ развития активно исследуется рядом ученых и специалистов. Так, в своей работе Т. К. Гоманова и К. М. Башпакова [8] предприняли попытку классифицировать методики оценки региональных программ, применяемых органами государственной власти субъектов Российской Федерации. А. Г. Бреусова и др. [9] при классификации таких методик ориентируются на уровень реализации программы.

Большинство рассмотренных Т. К. Гомановой и К. М. Башпаковой [8] методик ориентированы на формирование интегрального показателя эффективности программы либо на основе балльной оценки, либо с использованием весовых коэффициентов, и разделяют все программы на три уровня эффективности. Вместе с этим некоторые регионы используют методики оценки, учитывающие динамику предыдущих лет или бюджетную эффективность мероприятий программы. Однако авторы отмечают, что методики, используемые органами власти, объединяет принцип оценки, основанный на соотношении плановых и достигнутых значений показателя, а также выделенного финансирования, указывая на то, что такой подход позволяет получать достаточно высокие показатели эффективности реализации программы.

Е. В. Кузнецова и В. А. Горин [10] предлагают формировать интегральный показатель эффективности реализации программы на основе произведения степени достижения плановых значений целевых показателей и эффективности использования средств регионального бюджета. В модели оценки авторы значительное внимание уделили план-фактному анализу и степени соответствия поставленным планам, игнорируя при этом динамику изменения показателей.

Важность правильного формирования индикаторов реализации программы отмечают Р. Г. Мальсагова и И. Н. Ленков [11], подчеркивая необходимость учета специфики программ при оценке их эффективности и невозможности использования универсальных методик.

Выявленные недостатки существующих методик оценки, такие как слабый учет временного фактора, ориентация на план-фактный анализ, а не на достигнутые результаты, сложность и специфичность индикаторов реализации программ актуализировали необходимость разработки методики, позволяющей, не формируя интегральный показатель, классифицировать программы по эффективности их реализации. В связи с вышеизложенным целью исследования стала разработка алгоритма экспресс-оценки эффективности реализации региональных программ развития в рамках национальных проектов России на примере программ Пензенской области, позволяющих оценить эффективность распределения средств по мероприятиям национальных проектов и достигнутые результаты.

Материалы и методы

Для анализа результатов реализации региональных проектов используются следующие экономико-статистические научные методы: анализ отклонений, коэффициентный анализ, структурный анализ, анализ ряда динамики, матричный анализ, метод ранжирования, метод зонирования.

Степень устойчивости структуры финансирования региональных проектов в Пензенской области определялась на основе расчета коэффициента

структурных сдвигов Рябцева, значение которого необходимо интерпретировать с использованием шкалы, представленной в табл. 1 [12]:

$$K_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (d_{ij} - d_{ij-1})^2}{\sum_{i=1}^k (d_{ij} + d_{ij-1})^2}}.$$

Таблица 1

Масштаб структурных сдвигов по Рябцеву

K_p	Структурные различия	K_p	Структурные различия
0,000–0,030	Тождественность структур	0,301–0,500	Значительный уровень различий
0,031–0,070	Весьма низкий уровень различий	0,501–0,700	Весьма значительный уровень различий
0,071–0,150	Низкий уровень различий	0,701–0,900	Противоположный тип структур
0,151–0,300	Существенный уровень различий	0,901–1,000	Полная противоположность структур

В ходе исследования предложена экспресс-оценка эффективности региональных программ развития Пензенской области, реализуемых в рамках национальных проектов России, позволяющая выявить недофинансированные (условно эффективные) и перефинансированные (условно неэффективные) проекты. Степень недо- или перефинансирования проектов оценивается с применением классического «золотого правила экономики», в основе которого лежит сопоставление темпов роста результатов деятельности хозяйствующего субъекта и затрат на их достижение [13]. В данном исследовании под результатами освоения региональных проектов целесообразно понимать количественные индикаторы реализации этих проектов, а под затратами – объемы их финансирования из бюджетов всех уровней.

Составление матрицы эффективности региональных проектов (табл. 2) основано на сравнении темпов роста объемов финансирования региональных проектов $Tr(\Phi)$ и темпов роста соответствующих индикаторов по проектам $Tr(I)$, рассчитанных за этот же период. Следует иметь в виду, что количество индикаторов может отличаться по различным региональным проектам. Тогда предлагается следующий алгоритм распределения проектов по степени эффективности их реализации:

- если $Tr(\Phi) > Tr(I)$ у 0 % индикаторов по проекту, то такой проект попадает в зону «А» – область полной эффективности реализации проекта;
- если $Tr(\Phi) > Tr(I)$ у 1–25 % индикаторов по проекту, то такой проект попадает в зону «В» – область частичной эффективности реализации проекта;
- если $Tr(\Phi) > Tr(I)$ у 26–50 % индикаторов по проекту, то такой проект попадает в зону «С» – область промежуточной эффективности реализации проекта;
- если $Tr(\Phi) > Tr(I)$ у 51–75 % индикаторов по проекту, то такой проект попадает в зону «D» – область частичной неэффективности реализации проекта;

– если $Tr(\Phi) > Tr(I)$ у 76–100 % индикаторов по проекту, то такой проект попадает в зону «Е» – область полной неэффективности реализации проекта.

Таблица 2

Матрица оценки эффективности реализации региональных проектов (составлено авторами)

Зона	$Tr(\Phi) > Tr(I)$	Региональные проекты				Национальные проекты
		код	число, ед.	удельный вес, %	ранг по эффективности	код
А – полной эффективности	0 % индикаторов					
В – частичной эффективности	1–25 % индикаторов					
С – промежуточной эффективности	26–50 % индикаторов					
Д – частичной неэффективности	51–75 % индикаторов					
Е – полной неэффективности	76–100 % индикаторов					

Группировка проектов по пяти зонам позволила выделить перефинансированные проекты (условно неэффективные), требующие дополнительного анализа расходования бюджетных средств на их реализацию.

Результаты и обсуждение

Постановлениями Правительства Пензенской области № 888-пП от 18.12.2020 и № 124-пП от 11.03.2021 утвержден перечень государственных программ развития области и назначены ответственные за их реализацию ведомства [14]. В структуре государственных программ развития Пензенской области выделяются региональные программы, реализуемые в рамках национальных проектов России, предполагающих федеральное, региональное и внебюджетное финансирование. Каждое мероприятие государственных программ развития в пределах региональных программ для оценки эффективности его выполнения имеет не менее одного индикатора эффективности. В настоящий момент в области реализуются 24 государственные программы развития, 23 (96 %) из которых планируются к завершению в 2024 г. За эффективность и сроки выполнения этих программ отвечает 21 орган государственной власти Пензенской области. В соответствии с утвержденным областным бюджетом, его расходная часть строится среди прочего в разрезе программ и непрограммных направлений деятельности органов государственной власти Пензенской области (рис. 1) [15].

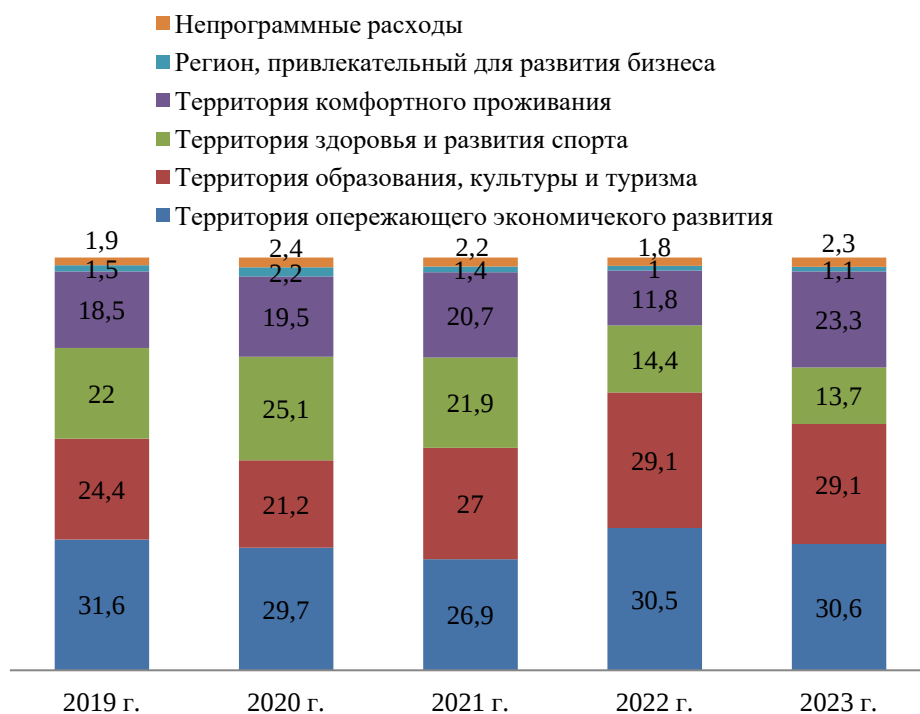


Рис. 1. Структура расходов бюджета Пензенской области по программным и непрограммным направлениям

В среднем по факту в 2019–2021 гг. и по плану в 2022–2023 гг. удельный вес непрограммных расходов бюджета составил 2,1 %. Большую же часть (97,9 %) формируют расходы бюджета по финансированию мероприятий в рамках программ развития Пензенской области. Однако далеко не все программы реализуются во исполнение национальных проектов России. Из 24 государственных программ всего лишь 11 программ реализуются по национальным проектам и больше половины – 13 программ – по собственной правительственной инициативе области. Эти 11 программ предусматривают мероприятия по реализации 35 федеральных или региональных программ, которые, в свою очередь, призваны претворить в жизнь 10 национальных проектов: «Демография» (Н01), «Здоровье» (Н02), «Образование» (Н03), «Экология» (Н05), «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (Н06), «Производительность труда» (Н07), «Цифровая экономика» (Н09), «Культура» (Н10), «Малое и среднее предпринимательство и поддержка индивидуальной предпринимательской инициативы» (Н11), «Международная кооперация и экспорт» (Н12).

Важно, чтобы региональные проекты область осуществляла эффективно, поэтому в исследовании предпринята попытка экспресс-диагностики эффективности региональных программ развития Пензенской области путем оценки сбалансированности результатов их исполнения с объемом выделенных на эти цели финансовых ресурсов. Так как методика предполагает сравнение результатов реализации проектов в динамике, то в исследовании были оставлены только 27 проектов, актуальных в 2020–2021 гг.

Структура распределения финансовых ресурсов по региональным проектам Пензенской области представлена в табл. 3.

Таблица 3

Структура распределения финансовых ресурсов по региональным проектам
Пензенской области (составлено авторами)

Региональный проект	Код	Финансирование, тыс. руб.		Тр(Ф), %	Удельный вес, %	
		2020	2021		2020	2021
1	2	3	4	5	6	7
Содействие занятости женщин – создание условий дошкольного образования для детей в возрасте до трех лет	П1	249 453	387 688	155	2,0	3,8
Старшее поколение	П2	25 753	376	1	0,0	0,0
Спорт – норма жизни	П3	462 638	799 120	173	3,0	7,9
Борьба с онкологическими заболеваниями	П4	702 277	251 915	36	4,0	2,5
Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями	П5	370 961	275 165	74	2,0	2,7
Развитие системы оказания первичной медико-санитарной помощи	П7	145 617	32 210	22	1,0	0,3
Обеспечение медицинских организаций системы здравоохранения квалифицированными кадрами	П8	30 906	28 320	92	0,0	0,3
Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами	П9	84 729	9630	11	1,0	0,1
Дорожная сеть	П11	3 515 198	3 854 725	110	22,0	38,0
Адресная поддержка повышения производительности труда на предприятиях	П12	27 072	21 716	80	0,0	0,2
Поддержка занятости и повышение эффективности рынка труда для обеспечения роста производительности труда	П13	3904	20 000	512	0,0	0,2
Акселерация субъектов малого и среднего предпринимательства	П15	947 579	473 457	50	6,0	4,7
Экспорт продукции АПК	П18	78 133	184 461	236	0,0	1,8
Информационная безопасность	П20	3500	29 071	831	0,0	0,3
Цифровое государственное управление	П21	6300	5868	93	0,0	0,1
Цифровизация услуг и формирование информационного пространства в сфере культуры «Цифровая культура»	П22	6040	1050	17	0,0	0,0
Создание условий для реализации творческого потенциала нации «Творческие люди»	П23	1463,5	3962	271	0,0	0,0

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
Обеспечение качественно нового уровня развития инфраструктуры	П24	108 045	15 466	14	1,0	0,2
Культурная среда	П25	292 524	281 954	96	2,0	2,8
Социальная активность	П26	12 333	10 531	85	0,0	0,1
Финансовая поддержка семей при рождении детей	П27	6 684 132	2 255 171	34	42,0	22,3
Современная школа	П28	481 264	378 243	79	3,0	3,7
Успех каждого ребенка	П29	77 203	244 077	316	0,0	2,4
Жилье	П32	577 033	266 803	46	4,0	2,6
Чистая вода	П33	10 025	53 680	535	0,0	0,5
Цифровая образовательная среда	П34	240 433	157 252	65	2,0	1,6
Молодые профессионалы	П35	104 520	66 478	64	1,0	0,7
Итого		15 973 521	10 132 865	63	100,0	100,0

Общий объем выделенных финансовых ресурсов на осуществление мер в рамках региональных проектов в 2021 г. по сравнению с 2020 г. уменьшилось на 5,8 млрд руб. (на 37 %). Большую часть средств (22 % в 2020 г. и 38 % в 2021 г.) область выделяет на финансирование программ по развитию дорожной сети, а также на финансовую поддержку семей при рождении детей (42 % в 2020 г. и 22,3 % в 2021 г.). Существенное финансирование (порядка 3–5 %) выделяется на содействие занятости женщин – создание условий дошкольного образования для детей до 3 лет, мероприятия по популяризации спорта, поддержка малого и среднего предпринимательства и модернизация школьного образования. К 2021 г. по сравнению с 2020 г. максимальными темпами увеличивалась поддержка занятости и повышение эффективности рынка труда для стимулирования производительности труда, информационная безопасность, обеспечение населения области чистой водой.

Поскольку расчетный коэффициент структурных различий Рябцева составил 0,24 (он попал в группу 0,151–0,300), можно сделать вывод о значительном уровне структурных различий в финансировании региональных проектов Пензенской области. Таким образом, финансирование проектов к 2021 г. по сравнению с 2020 г. претерпело существенные изменения не только в объемных соотношениях, но и в структуре распределения ресурсов по проектам.

Финансирование региональных проектов в Пензенской области осуществляется средствами бюджетов всех уровней – федеральным, областным, городским и внебюджетными источниками [6]. Приоритеты в финансировании региональных проектов меняются, поэтому в данном исследовании предложен подход к оценке эффективности распределения финансовых ресурсов между региональными проектами на основе построения матрицы эффективности (табл. 4).

На основе табл. 4 построим табл. 5, в которой все региональные проекты Пензенской области, реализуемые в рамках национальных проектов Российской Федерации, разнесены по зонам в зависимости от степени эффективности их осуществления. Матрица эффективности также позволяет ранжировать эти проекты по процентному соотношению числа результативно достигнутых индикаторов по сравнению с объемом выделенных на эти цели финансовых ресурсов.

Таблица 4

Соотношение темпов роста объемов финансирования
и достижения результатов по региональным проектам
Пензенской области (составлено авторами)

Код проекта	Тр(Ф), %	Число индикаторов	Тр(И) > Тр(Ф)	Тр(Ф), % > Тр(И), %				
				0	1–25	26–50	51–75	76–100
П2	1	2	2 (100 %)					
П3	173	13	1 (8 %)				5 (38 %)	7 (54 %)
П4	36	1	1 (100 %)					
П5	74	2	1 (50 %)	1 (50 %)				
П7	22	2	2 (100 %)					
П8	92	5	4 (80 %)		1 (20 %)			
П9	11	1	1 (100 %)					
П11	110	1	1 (100 %)					
П12	80	3	1 (33 %)				1 (33 %)	1 (33 %)
П13	512	1	1 (100 %)					
П15	50	13	6 (46 %)	1 (8 %)		6 (46 %)		
П20	831	1						1 (100 %)
П21	93	2	2 (100 %)					
П22	17	5	2 (40 %)		3 (60 %)			
П23	271	6						6 (100 %)
П25	96	7	5 (71 %)			2 (29 %)		
П27	34	2	2 (100 %)					
П28	79	7	7 (100 %)					
П29	316	4						4 (100 %)
П32	46	1	1 (100 %)					
П34	65	3	2 (66 %)				1 (33 %)	
П35	64	3	3 (100 %)					

Таблица 5

Матрица оценки эффективности реализации региональных проектов
в Пензенской области (составлено авторами)

Зона	Тр(Ф) > Тр(И)	Региональные проекты				Национальные проекты (код)
		код	число, ед.	удельный вес, %	ранг по эффективности	
1	2	3	4	5	6	7
А – полной эффективности	0 % индикаторов	П2, П4, П7, П9, П11, П13, П21, П27, П28, П32, П35	11	52 %	100 %	Н01, Н02, Н03, Н04, Н05, Н06, Н09
В – частичной эффективности	1–25 % индикаторов	П8	1	5 %	80 %	Н02

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7
С – промежуточной эффективности	26–50 % индикаторов	П5, П12, П15, П22	4	19 %		Н02, Н07, Н11, Н10
Д – частичной неэффективности	51–75 % индикаторов	П25, П34	2	10 %		Н10, Н03
Е – полной неэффективности	76–100 % индикаторов	П3, П23, П29	3	14 %		Н01, Н10, Н03

В Пензенской области 11 ед. (52 %) всех региональных проектов реализуются со 100 % эффективностью. Остальные 10 ед. (48 %) проектов частично или полностью неэффективны. Особо стоит выделить зону полной неэффективности, в которую в 2021 г. попали региональные проекты «Спорт – норма жизни», «Творческие люди», «Успех каждого ребенка». Достаточно проблемно в 2021 г. были исполнены проекты «Цифровая образовательная среда» и «Культурная среда».

По проекту «Спорт – норма жизни» наблюдается существенное увеличение финансирования, в то время как рост показателей эффективности не такой значительный. Это может быть связано со строительством новых спортивных объектов, эффект от ввода в эксплуатацию которых отсрочен. Аналогичная ситуация в реализации проекта «Творческие люди», выполнение которого предполагает рост показателей эффективности, однако увеличение финансирования в разы выше указанных значений. Проект «Успех каждого ребенка» предполагает почти трехкратное увеличение финансирования, однако показатели эффективности либо снижаются, либо остаются на прежнем уровне. Проект «Демография» входит одновременно в две противоположные зоны – полной эффективности и неэффективности. Это объясняется тем, что два региональных проекта в его составе («Старшее поколение» и «Спорт – норма жизни») исполнены в 2021 г. с кардинально разными результатами. Подобная ситуация с исполнением проекта «Образование». Так, три региональных проекта в его составе попали в три разные зоны – полной и промежуточной эффективности и полной неэффективности.

Аналогичные выводы можно сделать и о подавляющем большинстве других национальных проектов. Единственные четыре проекта, в рамках которых все региональные программы области в 2021 г. реализовала максимально эффективно, – это «Экология», «Цифровая экономика» и «Безопасные и качественные автомобильные дороги». К слову, на исполнение последнего, как было отмечено выше, был выделен максимальный объем бюджетных средств.

Заключение

Национальные проекты России призваны стимулировать экономическое развитие регионов и решать социально значимые проблемы. В Пензенской области реализуется 35 региональных программ в рамках 11 национальных проектов. В 2021 г. финансирование региональных проектов в Пензенской области снизилось на 37 % по сравнению с 2020 г. Вместе с этим изменившиеся социально-экономические условия значительно обострили проблему дефицита бюджетных ресурсов и необходимость их рационального расходования,

для решения которой авторами была разработана методика экспресс-оценки эффективности мероприятий региональных программ.

В основе методики лежит «золотое правило экономики», которое предполагает сравнение темпов роста объемов финансирования региональных мероприятий и соответствующих им показателей эффективности. Методика дает возможность построить матрицу эффективности, позволяющую ранжировать проекты по процентному соотношению числа результативно достигнутых индикаторов по сравнению с объемом потребленных финансовых ресурсов. В итоге можно выделить зоны с недофинансированными (условно эффективными) и перефинансированными (условно неэффективными) проектами. Последние требуют дополнительного анализа расходования бюджетных средств на их реализацию.

Предлагаемый подход позволяет сбалансировать финансовые усилия при реализации всех региональных программ, исполняемых в рамках конкретного национального проекта. Для этого необходимо более обоснованно подходить к распределению денежных средств по мероприятиям региональных программ, выделяемых на реализацию каждого национального проекта. Так, например, по результатам проведенного анализа можно порекомендовать Пензенской области расширить перечень национальных проектов, актуальных для участия, и критически пересмотреть индикаторы, которыми оцениваются результаты региональных программ развития территории.

Показанная в исследовании методика экспресс-оценки эффективности региональных программ частично нивелирует недостатки существующих подходов к решению подобной проблемы, предложенных Е. А. Федченко, А. О. Буряковой, Т. К. Гомановой, К. М. Башпаковой, А. Г. Бреусовой, Е. В. Кузнецовой, В. А. Гориным, Р. Г. Мальсаговой, И. Н. Ленковым и рядом других авторов. Так, например, изложенная методика позволяет, не формируя интегральный показатель, классифицировать программы по эффективности их реализации. Кроме того, она в большей степени не делает акцент на временной фактор, а ориентируется в основном на достигнутые результаты, учитывая сложность и комплексность индикаторов реализации каждой региональной программы развития. Однако представленный подход к оценке эффективности региональных программ развития территорий также не является абсолютно универсальным, поскольку основан на учете сугубо специфических индикаторов реализации этих программ. Кроме того, данная методика не позволяет выработать однозначные меры по повышению эффективности реализации региональных программ, но лишь позволяет на этапе предварительного анализа оперативно классифицировать такие проекты и выделять недостаточно эффективные. Таким образом, доработка оценочной методики в направлении повышения ее универсальности и обоснования необходимых управленческих решений для решения проблемы повышения эффективности реализации региональных программ развития территории является сферой дальнейших научных исследований.

Список литературы

1. Волкова Е. Ю. Место программно-целевого подхода в системе стратегического управления экономикой РФ // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2021. № 19. С. 167–191. doi: 10.47711/2076-318-2021-167-191

2. Минаков А. В., Лапина С. Б. Реализация федеральных целевых программ как необходимое условие обеспечения экономической безопасности государства // Образование. Наука. Научные кадры. 2021. № 2. С. 161–167. doi: 10.24411/2073-3305-2021-2-161-167
3. Шпак А. С., Амирова М. А. Оценка соответствия региональных государственных программ в инвестиционной сфере принципам программно-целевого управления // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 5-3 (107). doi: 10.23670/IRJ.2021.107.5.079
4. Середа Е. И. Перспективы эффективного управления сбалансированным развитием региональных центров роста // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019. № 1-2. С. 27–32.
5. Шабалина Т. А. Муниципальные программы в развитии территорий как элемент программно-целевого метода управления // Московский экономический журнал. 2021. № 10. С. 510–518. doi: 10.24412/2413-046X-2021-10613
6. Федченко Е. А., Бурякова А. О. Оценка эффективности государственных программ // Вестник Государственного университета управления. 2020. № 12. С. 76–86. doi: 10.26425/1816-4277-2020-12-76-86
7. Об утверждении Правил формирования сводного годового доклада о ходе реализации и оценке эффективности государственных программ Российской Федерации, внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ № 903 от 17 июля 2019 г. : [с изм. и доп.].
8. Гоманова Т. К., Башпакова К. М. Совершенствование методики оценки эффективности государственных программ: региональный аспект // Региональная экономика и управление. 2018. № 3. URL: <https://eee-region.ru/article/5510/> (дата обращения: 12.06.2023).
9. Бреусова А. Г. Оценка эффективности государственных программ // Вестник Омского государственного университета. Сер.: Экономика. 2015. № 2. С. 128–136.
10. Кузнецова Е. Г., Горин И. А. Оценка эффективности государственных программ развития региона: практические и методические аспекты // Вестник Российского университета кооперации. 2017. № 4. С. 32–37.
11. Мальсагова Р. Г., Ленков И. Н. Анализ эффективности государственных программ стимулирования экономики // Инновации и инвестиции. 2022. № 4. С. 59–62.
12. Балдин К. В., Рукосуев А. В. Общая теория статистики : учеб. пособие. 3-е изд., стер. М. : Дашков и К°, 2020. 312 с.
13. Мельник М. В., Кривцов А. И., Лихтарова О. В. Комплексный экономический анализ : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М. : ИНФРА-М, 2021. 368 с.
14. Методические рекомендации по разработке и реализации государственных программ Пензенской области : [в ред. Приказов Министерства экономики Пензенской области № 27 от 01.03.2019, № 57 от 07.06.2016, № 10 от 02.03.2021]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/432998602> (дата обращения: 12.06.2023).
15. Бюджет Пензенской области для граждан на 2022 год и плановый период 2023 и 2024 годов. URL: https://finance.pnzreg.ru/files/files/otkrbud/bud_21.pdf (дата обращения: 12.06.2023).
16. Панеш К. М., Хатукай С. А., Бабалян Э. Б. Эффективные инструменты и методы оценки программно-целевого подхода к управлению экономикой региона // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 8. doi: 10.23670/IRJ.2022.122.36
17. Коваленко Е. Г., Пронина Ю. Ю., Князькина А. А. Моделирование приоритетов инвестирования в развитие сельских территорий Пензенской области // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 1. С. 68–77. doi: 10.21685/2227-8486-2020-1-5
18. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента Российской Федерации : [с изм. на 21.07.2020].

URL: <https://docs.cntd.ru/document/557309575?marker=7D20K3> (дата обращения: 12.06.2023).

19. Стратегия социально-экономического развития Пензенской области до 2035 года. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/9db6bfb4d7d637d5aa55324f2e89e24b/strateg2035+02.07.pdf> (дата обращения: 12.06.2023).
20. Отчеты об исполнении государственных программ Пензенской области. URL: <https://econom.pnzreg.ru/ekonomika/gosudarstvennye-programmy/otchety-ob-ispolnenii-gosudarstvennykh-programm/> (дата обращения: 12.06.2023).

References

1. Volkova E.Yu. The place of the program-target approach in the system of strategic management of the economy of the Russian Federation. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN = Scientific papers: Institute of National Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*. 2021;(19):167–191. (In Russ.). doi: 10.47711/2076-318-2021-167-191
2. Minakov A.V., Lapina S.B. Implementation of federal target programs as a necessary condition for ensuring the economic security of the state. *Obrazovanie. Nauka. Nauchnye kadry = Education. The science. Scientific personnel*. 2021;(2):161–167. (In Russ.). doi: 10.24411/2073-3305-2021-2-161-167
3. Shpak A.S., Amirova M.A. Assessment of compliance of regional state programs in the investment sphere with the principles of program-targeted management. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2021;(5-3). (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2021.107.5.079
4. Sereda E.I. Prospects for effective management of balanced development of regional growth centers. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2019; (1-2):27–32. (In Russ.)
5. Shabalina T.A. Municipal programs in the development of territories as an element of the program-target management method. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2021;(10):510–518. (In Russ.). doi: 10.24412/2413-046Kh-2021-10613
6. Fedchenko E.A., Buryakova A.O. Evaluation of the effectiveness of state programs. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta upravleniya = Bulletin of the State University of Management*. 2020;(12):76–86. (In Russ.). doi: 10.26425/1816-4277-2020-12-76-86
7. *Ob utverzhdenii Pravil formirovaniya svodnogo godovogo doklada o khode realizatsii i otsenke effektivnosti gosudarstvennykh programm Rossiyskoy Federatsii, vnesenii izmeneniy v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii i priznanii utrativshimi silu otdel'nykh polozheniy nekotorykh aktov Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii: postanovlenie Pravitel'stva RF № 903 ot 17 iyulya 2019 g.: [s izm. i dop.] = On approval of the Rules for the Formation of a consolidated annual report on the Implementation and Evaluation of the Effectiveness of state Programs of the Russian Federation, Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation and Invalidation of Certain Provisions of Certain Acts of the Government of the Russian Federation: Decree of the Government of the Russian Federation No. 903 of July 17, 2019: [with amendments and additions]*. (In Russ.)
8. Gomanova T.K., Bashpakova K.M. Improving the methodology for evaluating the effectiveness of state programs: a regional aspect. *Regional'naya ekonomika i upravlenie = Regional economics and management*. 2018;(3). (In Russ.). Available at: <https://eee-region.ru/article/5510/> (accessed 12.06.2023).
9. Breusova A.G. Evaluation of the effectiveness of state programs. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika = Bulletin of Omsk State University. Ser.: Economics*. 2015;(2):128–136. (In Russ.)
10. Kuznetsova E.G., Gorin I.A. Evaluation of the effectiveness of state programs for the development of the region: practical and methodological aspects. *Vestnik Rossiyskogo*

- universiteta kooperatsii = *Bulletin of the Russian University of Cooperation*. 2017;(4):32–37. (In Russ.)
11. Mal'sagova R.G., Lenkov I.N. Analysis of the effectiveness of state programs to stimulate the economy. *Innovatsii i investitsii = Innovations and investments*. 2022;(4): 59–62. (In Russ.)
 12. Baldin K.V., Rukosuev A.V. *Obshchaya teoriya statistiki: ucheb. posobie. 3-e izd., ster. = General theory of statistics : textbook. 3rd ed., ster.* Moscow: Dashkov i K°, 2020:312. (In Russ.)
 13. Mel'nik M.V., Krivtsov A.I., Likhtarova O.V. *Kompleksnyy ekonomicheskii analiz: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. = Complex economic analysis : textbook. 2nd ed., ispr. and add.* Moscow: INFRA-M, 2021:368. (In Russ.)
 14. *Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke i realizatsii gosudarstvennykh programm Penzenskoy oblasti: [v red. Priказov Ministerstva ekonomiki Penzenskoy oblasti № 27 ot 01.03.2019, № 57 ot 07.06.2016, № 10 ot 02.03.2021] = Methodological recommendations for the development and implementation of state programs of the Penza region: [ed. Orders of the Ministry of Economy of the Penza Region No. 27 dated 01.03.2019, No. 57 dated 07.06.2016, No. 10 dated 02.03.2021].* (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/432998602> (accessed 12.06.2023).
 15. *Byudzhet Penzenskoy oblasti dlya grazhdan na 2022 god i planovyy period 2023 i 2024 godov = The budget of the Penza region for citizens for 2022 and the planning period of 2023 and 2024.* (In Russ.). Available at: https://finance.pnzreg.ru/files/files/otkr-bud/bud_21.pdf (accessed 12.06.2023).
 16. Panesh K.M., Khatukay S.A., Babalyan E.B. Effective tools and methods for evaluating the program-target approach to managing the region's economy. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2022;(8). (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2022.122.36
 17. Kovalenko E.G., Pronina Yu.Yu., Knyaz'kina A.A. Modeling of investment priorities in the development of rural areas of the Penza region. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(1):68–77. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2020-1-5
 18. *O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda: ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii [s izm. na 21.07.2020] = On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024: Decree of the President of the Russian Federation [as amended on 21.07.2020].* (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/557309575?marker=7D20K3> (accessed 12.06.2023).
 19. *Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Penzenskoy oblasti do 2035 goda = The strategy of socio-economic development of the Penza region until 2035.* (In Russ.). Available at: <https://www.economy.gov.ru/material/file/9db6bfb4d7d637d5aa55324f2e89e24b/strateg2035 + 02.07.pdf> (accessed 12.06.2023).
 20. *Otchety ob ispolnenii gosudarstvennykh programm Penzenskoy oblasti = Reports on the implementation of state programs of the Penza region.* (In Russ.). Available at: <https://econom.pnzreg.ru/ekonomika/gosudarstvennye-programmy/otchety-ob-ispolnenii-gosudarstvennykh-programm/> (accessed 12.06.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Нина Валерьевна Некрылова

кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономики и финансов,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nina-nekrylova@yandex.ru

Nina V. Nekrylova

Candidate of economical sciences,
associate professor of the sub-department
of economics and finance,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ирина Геннадьевна Хохлова

кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономики и финансов,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: irina_khokhlova@inbox.ru

Irina G. Khokhlova

Candidate of economical sciences,
associate professor of the sub-department
of economics and finance,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Татьяна Викторовна Кузнецова

старший преподаватель кафедры
экономики и финансов,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: t.v.kuznetsova.penza@yandex.ru

Tatiana V. Kuznetsova

Senior lecturer of the sub-department
of economics and finance,
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 09.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 06.03.2023

Принята к публикации/Accepted 11.03.2023

МОДЕЛИ РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ УНИВЕРСИТЕТОВ

Г. В. Суровицкая

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
Пензенский казачий институт технологий (филиал)
Московского государственного университета технологий и управления
имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Пенза, Россия
gvs_kachestvo@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Решение задач импортозамещения и импорто-опережения в рамках национального проекта «Наука и университеты» привязано к реализации программ развития университетов – участников программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030». Для обеспечения эффективности программ развития университетов необходимы адекватные модели реализации представленных в них политик. Целью исследования является развитие теоретико-методических подходов к формированию моделей реализации инновационной политики университетов Приволжского федерального округа, являющихся участниками программы «Приоритет 2030». *Материалы и методы.* Решение задач исследования базируется на анализе эффективности моделей реализации инновационной политики университетов округа, получивших государственную поддержку как в виде специальной части гранта, так и в виде только базовой части гранта. Для этого использованы данные мониторинга эффективности вузов 2019–2021 гг., данные Национального рейтинга университетов 2019–2022 гг., данные рейтинга «индекс изобретательской активности российских университетов» 2022 г. Вместе с бенчмаркинговым анализом использован сравнительный анализ программ развития университетов в части реализации научно-исследовательской политики и политики в области инноваций и коммерциализации разработок. *Результаты.* По результатам анализа установлено наличие периода плавного эволюционного развития систем управления инновациями у 58 % исследованных университетов с различными скоростями развертывания новых механизмов управления инновациями. Анализ программ развития университетов на период до 2030 г. показал доминирование проектного подхода и наличие тенденции к развертыванию экосистемного подхода в управлении инновациями. *Выводы.* Целесообразно расширить возможности моделей реализации инновационной политики за счет использования инструментов бережливого производства, продуктового подхода и др. Проведенные исследования не претендуют на полноту картины относительно всей группы университетов, вошедших в программу «Приоритет 2030», так как охватывают только часть ее участников. Работа представляет интерес для исследователей системы высшего образования в контексте диверсификации механизмов повышения эффективности деятельности.

Ключевые слова: университет, регион, инновационная политика, инновационная экосистема, модель, эффективность

Для цитирования: Суровицкая Г. В. Модели реализации инновационной политики университетов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 77–86. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-5

MODELS FOR THE IMPLEMENTATION OF INNOVATION POLICY OF UNIVERSITIES

G.V. Surovitskaya

Penza State University, Penza, Russia
Penza Cossack Institute of Technology (branch) of the K.G. Razumovsky Moscow State
University of Technology and Management (First Cossack University), Penza, Russia

Abstract. *Background.* The solution of the tasks of import substitution and import advance within the framework of the National Project «Science and Universities» is tied to the implementation of development programs for universities participating in the program of strategic academic leadership «Priority 2030». To ensure the effectiveness of university development programs, adequate models for the implementation of the policies presented in them are needed. The aim of the study is to develop theoretical and methodological approaches to the formation of models for implementing the innovation policy of the universities of the Volga Federal District, which are participants in the «Priority 2030» program. *Materials and methods.* The solution of the research tasks is based on the analysis of the effectiveness of the models for implementing the innovation policy of the universities of the district, which received state support both in the form of a special part of the grant, and in the form of only the basic part of the grant. To do this, we used data from monitoring the effectiveness of universities in 2019–2021, given by the National University Ranking 2019–2022, given by the Inventive Activity Index of Russian Universities 2022. Together with a benchmarking analysis, a comparative analysis of university development programs was used in terms of the implementation of scientific and research policy and policy in the field of innovation and commercialization of developments. *Results.* Based on the results of the analysis, a period of smooth evolutionary development of innovation management systems was found in 58 % of the studied universities with different rates of deployment of new innovation management mechanisms. An analysis of university development programs for the period up to 2030 showed the dominance of the project approach and the presence of a trend towards the deployment of an ecosystem approach in innovation management. *Conclusions.* It is advisable to expand the possibilities of innovation policy implementation models through the use of lean production tools, product approach, etc. The conducted research does not pretend to be a complete picture of the entire group of universities included in the «Priority 2030» Program, since it covers only a part of its participants. The article is of interest to researchers of the higher education system in the context of the diversification of mechanisms for increasing the efficiency of activities.

Keywords: university, region, innovation policy, innovation ecosystem, model, efficiency

For citation: Surovitskaya G.V. Models for the implementation of innovation policy of universities. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):77–86. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-5

Введение

В настоящее время возрастает роль инновационной деятельности университетов как фактора импортозамещения и импортоопережения, что обуславливает целесообразность развития подходов к реализации инновационной политики вузов.

Университеты включены в национальную инновационную систему, которая объединяет все стадии жизненного цикла объекта интеллектуальной собственности от идеи до коммерциализации. Наблюдаемые сравнительно низкие

показатели коммерческого использования интеллектуальной собственности обуславливают необходимость выработки особых подходов на всех уровнях экономических систем [1]. Одним из таких подходов является разработка региональных стандартов управления интеллектуальной деятельностью, в рамках которых должна быть определена роль университетов в функционировании процессов выявления, оформления и выбора режима защиты интеллектуальной собственности; процессов маркетинга интеллектуальной собственности; процессов бренд-менеджмента на рынке интеллектуальной собственности [2].

С позиций экосистемного подхода перспективными представляются модели реализации инновационной политики посредством формирования и развития инновационных экосистем, поскольку они подразумевают коэволюцию ее участников на всем протяжении их взаимодействия, в том числе региональных инновационных экосистем как динамичных открытых структур, члены которых совместно используют технологии и компетенции для развития инноваций в конкретном регионе в контексте диверсификации экономики и обеспечения эффективности коммерциализации технологий [3, 4].

Университеты могут рассматриваться как экосистемы, в которых инновационные (проектные) подсистемы нацелены на аккумуляцию и развитие потенциальных способностей экосистем использовать пространственно-временные ресурсы в целях аккумуляции, производства и распространения знаний [5, 6]. Позиционирование университетов в качестве ядра инновационных систем требует создания инновационно восприимчивой структуры управления университетом в целом, в том числе с использованием цифровых технологий [7].

Несмотря на то, что университеты играют значимую роль в развитии инновационных экосистем, стать драйверами экономического развития им пока мешают такие барьеры, как недостаточная эффективность механизмов стратегического управления инновационной деятельностью, механизмов управления интеллектуальной собственностью, механизмов инкубации технологических стартапов и др. [8]. Такое положение дел обуславливает целесообразность внедрения новых инструментов повышения эффективности деятельности вузов. К ним относятся инструменты бережливого производства с позиций проектного подхода, электронного документооборота, организации рабочих мест по системе 5S и т.п. [9], инструменты продуктового подхода и инструменты управления Agile-проектами [10].

В связи с вышесказанным цель настоящего исследования состоит в развитии теоретико-методических подходов к формированию моделей реализации инновационной политики университетов.

Материалы и методы

Объектом исследования являются университеты Приволжского федерального округа, подведомственные Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, которые получили государственную поддержку в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030». Таких университетов 19, из них пять университетов получили поддержку в виде специальной части гранта, в том числе по треку «Исследовательское лидерство» – один университет – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».

Сравнительный анализ моделей реализации инновационной политики университетов проведен с использованием программ развития в период с 2022 до 2030 г.

Оценка эффективности моделей предшествующих периодов осуществлена в рамках бенчмаркинг-анализа на основе данных мониторинга эффективности вузов, данных Национального рейтинга университета, формируемого Международной информационной группой «Интерфакс», и данных рейтинга «Индекс изобретательской активности российских университетов», формируемого аналитическим центром «Эксперт».

Релевантность используемых моделей доказана с использованием альфа-статистики Кронбаха (приемлемым считается значение в интервале от 0,7 до 1,0).

При рассмотрении аспектов развития инновационной экосистемы для уточнения его характера (адаптационный при плавном эволюционном развитии или бифуркационный) учтено, что в рамках неравновесной термодинамики доказана эволюция (развитие) открытых систем к состоянию с наименьшей из возможных в данных условиях скоростью v_s производства энтропии S . Скорость производства энтропии определяется как производная последней по времени:

$$\frac{dS}{dt} = k \frac{1}{\Pi} \frac{d\Pi}{dt} = v_s \neq 0,$$

где k – некоторый ненулевой коэффициент пропорциональности; Π – сводный показатель эффективности реализации инновационной политики.

В результате интегрирования получим

$$\Pi = \Pi_0 e^{\frac{v_s}{k} t} = \Pi_0 e^{at}, \quad (1)$$

где Π_0 – начальное значение показателя Π в исследуемом периоде; a – параметр, зависящий от скорости (v_s) изменения значения показателя Π .

Если ретроспективный анализ показывает экспоненциальный характер роста значений показателя Π , то имеет место период плавного эволюционного развития. Для оценки достоверности выводов на основе анализа вида формулы (1) использован критерий детерминации R^2 , статистическая значимость которого доказана с использованием F -теста на качество оценивания (приемлемым считается значение R^2 в интервале от 0,5 до 1,0).

Результаты

В ходе исследования рассматриваемые университеты разделены на две группы. К группе 1 отнесены университеты, получившие государственную поддержку в виде специальной части гранта, к группе 2 – только в виде базовой части гранта. В группе 1 40 % университетов участвовали в Проекте 5-100, еще 40 % – в проекте по созданию опорных университетов; в группе 2 в Проекте 5-100 участвовал один университет и еще 29 % университетов – в проекте по созданию опорных университетов (табл. 1). Для сравнительной оценки эффективности моделей реализации инновационной политики исследуемых университетов в последние годы использована совокупность восьми показателей мониторинга эффективности вузов, представленная в табл. 2.

Таблица 1

**Участие университетов в реализации предшествующих проектов
в системе высшего образования страны**

Проект	Университеты группы 1	Университеты группы 2
Проект 5-100	ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»
Проект по созданию опорных университетов	ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»	ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»

Таблица 2

Данные мониторинга эффективности вузов

Показатель	Среднее значение показателя					
	Группа 1			Группа 2		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
1	2	3	4	5	6	7
Число публикаций университета, индексируемых в системе РИНЦ, в расчете на 100 НПР, ед.	354,99	362,27	393,48	290,16	333,08	337,01
Общий объем НИОКР, тыс. руб.	775 852,54	746 671,34	840 449,60	366 493,80	402 165,04	402 855,10
Доля доходов от НИОКР в доходах университета, %	20,00	18,80	18,59	14,10	14,37	14,53
Число лицензионных соглашений, ед.	12	15	12	5	5	4
Доля средств от использования результатов интеллектуальной деятельности, в доходах университета, %	0,01	0,05	0,09	0,01	0,02	0,01

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Число грантов за отчетный период в расчете на 100 НПП, ед.	8,37	10,50	9,90	6,97	6,14	6,45
Число малых предприятий, ед.	21	17	15	13	12	12
Удельный вес внебюджетных средств в доходах от НИОКР, %	61,68	62,88	63,79	68,88	76,11	67,69

Для рассматриваемой совокупности показателей значение коэффициента альфа Кронбаха находится в пределах от 0,773 до 0,816.

В группе 1 ни один из университетов не показал устойчивого роста по показателям «Общий объем НИОКР» (в группе 2 рост показывают 29 % университетов), «Доля доходов от НИОКР в доходах университета» (в группе 2 рост у 14 % участников) и «Число малых предприятий» (в группе 2 незначительный рост наблюдается у одного университета и еще у 36 % участников значение показателя постоянно).

В группе 2 ни один из университетов не показал устойчивый рост по показателю «Число грантов за отчетный период в расчете на 100 НПП» (в группе 1 по этому показателю устойчиво растут 40 % участников).

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» и ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» показали устойчивый рост по 50 % показателей, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» – 37,5 % показателей, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» – по 25 % показателей.

Никогда не получали средства от использования интеллектуальной собственности 26 % исследуемых университетов.

Данные частного рейтинга «Инновации» Национального рейтинга университетов 2019–2022 гг. позволили сформировать прогнозные оценки показателя П (формула (1)) с высоким уровнем достоверности (табл. 3). С использованием формулы (1) и массивов балльных оценок в рейтинге «Инновации» по ряду университетов на основе ретроспективного анализа доказано наличие периода плавного эволюционного развития систем управления инновационной деятельностью университетов.

В табл. 3 не представлены следующие университеты, вошедшие в рейтинг изобретательской активности (рейтинг «Индекс изобретательской активности российских университетов») 2022 г.:

– группа 1: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (место 19–20) и ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» (37–42);

– группа 2: ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (19–20), ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (65–67), ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (75–83), ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева» (75–83), ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (99–107).

Таблица 3

Интерпретация данных ряда рейтингов университетов
в части эффективности инновационной деятельности

Университет	Вид формулы (1)	R^2	Место в рейтинге изобретательской активности 2022 г.
Группа 1. Трек «Исследовательское лидерство»			
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского	$\Pi = 438,76e^{0,0473t}$	0,6211	84–90
Группа 1. Трек «Территориальное и (или) отраслевое лидерство»			
Казанский (Приволжский) федеральный университет	$\Pi = 555,06e^{0,0403t}$	0,743	6–7
Уфимский государственный нефтяной технический университет	$\Pi = 329,15e^{0,0525t}$	0,7271	Не представлен
Группа 2			
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ	$\Pi = 586,8e^{-0,027t}$ снижение	0,8264	50–53
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева	$\Pi = 410,12e^{0,0457t}$	0,8508	14–15
Ульяновский государственный университет	$\Pi = 371,57e^{0,0136t}$	0,6468	37–42
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского	$\Pi = 322,27e^{0,0565t}$	0,8606	75–83
Пермский государственный национальный исследовательский университет	$\Pi = 312,09e^{-0,016t}$ снижение	0,8149	46–49
Удмуртский государственный университет	$\Pi = 245,71e^{0,0186t}$	0,6466	Не представлен
Оренбургский государственный университет	$\Pi = 226,07e^{0,0581t}$	0,9452	Не представлен
Казанский государственный энергетический университет	$\Pi = 225,62e^{0,1295t}$	0,8769	91–98

Как видно из табл. 3, наиболее динамично развиваются механизмы реализации инновационной политики ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» ($a = 0,1295$), ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» ($a = 0,0581$), ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» ($a = 0,0565$). Два университета (ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»

и ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет») демонстрируют отрицательную скорость наращивания инновационного потенциала.

В результате анализа содержания программ развития исследуемых университетов на период 2022–2030 гг., сформированных для участия в программе «Приоритет 2030», установлено, что формирование и развитие экосистем для стартапов и инновационного предпринимательства, инновационных экосистем, в том числе региональных инновационных экосистем, отражено в программах развития 47 % исследованных университетов.

Создание новых форм взаимодействия с регионами и совершенствование механизмов управления интеллектуальной собственностью в основном привязано к процессам цифровой трансформации.

Большинство университетов нацелены на максимальное задействование имеющегося задела в формате «Technology Push», в то время как в определенной степени внедрение продуктового подхода в управление инновациями может быть связано с реализацией такой стратегии коммерциализации разработок, как стратегия «Market-pull». Данную стратегию планируют реализовать, например, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» и ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Внедрение инструментов бережливого производства в процессы управления инновационной деятельностью и реализацию Agile-проектов не планировал ни один из исследуемых университетов.

Обсуждение

По мнению автора, университеты могли не включить в программы развития ряд аспектов реализации научно-исследовательской политики и политики в области инноваций и коммерциализации разработок, которые представлены в дорожных картах реализации программ, не размещенных в открытых источниках.

Учитывая определенную инерционность университетских систем, что подтверждается наличием периода плавного эволюционного развития у 58 % исследованных университетов (см. табл. 3), для достижения амбициозных целей, поставленных в программах развития, необходимо использование нетривиальных моделей реализации инновационной политики.

В состав таких моделей могут войти:

- механизмы обеспечения эффективности совместного развития в экосистеме университет-регион;
- механизмы формирования и внедрения региональных стандартов управления инновационной деятельностью;
- механизмы формирования системы Хосин Канри в целях развертывания инновационной политики.

Данные механизмы могут быть сформированы в рамках консорциумов, созданных для реализации программ развития университетов.

Заключение

Таким образом, на старте программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» большинство исследованных университетов

демонстрируют сформировавшиеся механизмы реализации инновационной политики, эффективность которых обеспечивает им определенную конкурентоспособность. Для повышения конкурентоспособности и достижения амбициозных целей инновационного развития необходима диверсификация состава моделей реализации инновационной политики университетов, в том числе с использованием представленных в настоящей статье рекомендаций.

Список литературы

1. Раттур Е. В. Управление интеллектуальной собственностью в Российской Федерации: региональный аспект // *Стратегия бизнеса*. 2021. Т. 9, № 6. С. 187–193.
2. Суровицкая Г. В., Чернецов М. В., Сорокин А. Ю. Совершенствование механизмов управления интеллектуальной собственностью в университетах // *Университетское управление: практика и анализ*. 2016. № 10. С. 150–161.
3. Акбердина В. В., Василенко Е. В. Инновационная экосистема: теоретический обзор предметной области // *Журнал экономической теории*. 2021. Т. 18, № 1. С. 462–473.
4. Раменская Л. А. Применение концепции экосистем в экономико-управленческих исследованиях // *Управленец*. 2020. Т. 11, № 4. С. 16–28.
5. Клейнер Г. Б. Современный университет как экосистема: институты междисциплинарного управления // *Journal of Institutional Studies*. 2019. № 11. С. 54–63.
6. Изотова А. Г., Гаврилюк Е. С. Экосистемный подход как новый тренд развития высшего образования // *Вопросы инновационной экономики*. 2022. Т. 12, № 2. С. 1211–1226.
7. Сергеева К. Н., Казанцева Н. В. Трансформация экосистемного подхода при реализации стратегий развития российских университетов // *Вестник Евразийской науки*. 2021. № 4. URL: <https://esj.today/PDF/19ECVN421.pdf> (дата обращения: 01.06.2022).
8. Усманов М. Р., Шишкин М. А., Назаров М. Г., Крылов П. А. Барьеры, препятствующие эффективному взаимодействию российских университетов и бизнес-компаний // *Университетское управление: практика и анализ*. 2021. № 25. С. 83–93.
9. Челомбитко А. Н. Влияние бережливого производства на основные результаты деятельности вузов // *Университетское управление: практика и анализ*. 2020. № 24. С. 100–115.
10. Борисов Н. С. Применение методов Agile в управлении проектами // *Индустриальная экономика*. 2021. № 1. С. 74–77.

References

1. Rattur E.V. Intellectual property management in the Russian Federation: regional aspect. *Strategiya biznesa = Business strategy*. 2021;9(6):187–193. (In Russ.)
2. Surovitskaya G.V., Chernetsov M.V., Sorokin A.Yu. Improving intellectual property management mechanisms at universities. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2016;(10):150–161. (In Russ.)
3. Akberdina V.V., Vasilenko E.V. Innovation ecosystem: a theoretical review of the subject area. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii = Journal of Economic Theory*. 2021;18(1):462–473. (In Russ.)
4. Ramenskaya L.A. Application of the concept of ecosystems in economic and managerial research. *Upravlenets = Manager*. 2020;11(4):16–28. (In Russ.)
5. Kleyner G.B. Modern University as an ecosystem: institutes of interdisciplinary management. *Journal of Institutional Studies*. 2019;(11):54–63. (In Russ.)
6. Izotova A.G., Gavriluk E.S. Ecosystem approach as a new trend in the development of higher education. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Issues of innovative economy*. 2022;12(2):1211–1226. (In Russ.)

7. Sergeeva K.N., Kazantseva N.V. Transformation of the ecosystem approach in the implementation of development strategies of Russian universities. *Vestnik Evraziyskoy nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2021;(4). (In Russ.). Available at: <https://esj.today/PDF/19ECVN421.pdf> (accessed 01.06.2022).
8. Usmanov M.R., Shishkin M.A., Nazarov M.G., Krylov P.A. Barriers preventing effective interaction between Russian universities and business companies. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2021;(25):83–93. (In Russ.)
9. Chelombitko A.N. The influence of lean production on the main results of the activities of universities. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2020;(24):100–115. (In Russ.)
10. Borisov N.S. Application of Agile methods in project management. *Industrial'naya ekonomika = Industrial Economics*. 2021;(1):74–77. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Галина Владимировна Суловицкая

доктор экономических наук, доцент,
начальник отдела менеджмента качества,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
профессор,
Пензенский казачий институт
технологий (филиал)
Московского государственного
университета технологий
и управления имени К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет)
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: gvs_kachestvo@inbox.ru

Galina V. Surovitskaya

Doctor of economical sciences,
associate professor,
head of quality management department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
professor,
Penza Cossack Institute of Technology
(branch) of the K.G. Razumovsky
Moscow State University of Technology
and Management (First Cossack University)
(6 Volodarsky street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.10.2022

Поступила после рецензирования/Revised 15.05.2023

Принята к публикации/Accepted 18.05.2023

ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В МУНИЦИПАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ

С. В. Зинченко¹, Е. М. Бижанова²

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

¹slatynova@mail.ru, ²janette@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование перспектив развития конъюнктуры рынка, изменений рыночных условий, динамики спроса и предложения, состояния конкурентной среды являются важным направлением маркетинговой деятельности любой организации. Актуальность исследования обусловлена особым характером спроса и предложения на рынке жилой недвижимости закрытых городов и необходимостью изучения факторов, на это влияющих. Так, категории квартир, которые в обычном городе реализуются в первую очередь, в закрытых городах могут оставаться невостребованными долгое время, что приводит к замораживанию денежных средств застройщиков, дополнительным затратам на содержание нереализованной недвижимости в сданном доме и в целом требует изменения предложения и маркетинговой политики строительных компаний. Целью работы является проведение маркетингового исследования конъюнктуры рынка жилой недвижимости ЗАТО г. Заречного Пензенской области, результаты которого позволят строительным компаниям ориентироваться на рынке и выстроить маркетинговую стратегию работы. *Материалы и методы.* Исследование конъюнктуры рынка жилой недвижимости ЗАТО г. Заречного Пензенской области предполагает анализ предложения, спроса, а также влияния внешних факторов на развитие рынка. Методологическую базу исследования составили общенаучные методы, методы анализа вторичных данных. Были использованы метод анализа и синтеза, сравнения и обобщения информации, системный подход, метод индукции и дедукции, вторичные и первичные маркетинговые исследования. Информационной базой исследования послужили материалы Росстата, Пензастата, Минстроя России, нормативно-правовые документы, результаты научных и маркетинговых исследований рынка недвижимости, собственные исследования авторов. *Результаты.* В результате проведенного исследования был проанализирован территориальный потенциал развития жилищного строительства ЗАТО г. Заречного Пензенской области, определены особенности спроса на недвижимость и факторы, на него влияющие, а также характер предложения жилой недвижимости на рынке и сложившейся конкурентной среды. *Выводы.* Несмотря на специфику спроса и предложения, наличие ограничивающих факторов, у рынка жилой недвижимости Заречного есть потенциал роста, который делает его перспективным для работы строительных компаний.

Ключевые слова: рынок недвижимости, маркетинговые исследования, конъюнктура рынка, закрытое административно-территориальное образование (ЗАТО)

Для цитирования: Зинченко С. В., Бижанова Е. М. Оценка территориального потенциала развития жилищного строительства в муниципальном образовании // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 87–110. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-6

ASSESSMENT OF THE TERRITORIAL POTENTIAL FOR THE DEVELOPMENT OF HOUSING CONSTRUCTION IN THE MUNICIPALITY

S.V. Zinchenko¹, E.M. Bijanova²

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

¹slatynova@mail.ru, ²janette@list.ru

Abstract. Background. The research of the prospects for the development of market conditions, changes in market conditions, the dynamics of supply and demand, the state of the competitive environment are an important area of marketing activity of any organization. The relevance of the research conducted in this work is due to the special nature of supply and demand in the residential real estate market of closed cities and the need to study the factors that influence this. Thus, the categories of apartments that are sold in an ordinary city in the first place, in closed cities may remain unclaimed for a long time, which leads to a freeze of developers' funds, additional costs for maintaining unsold real estate in a rented house and, in general, requires a change in the supply and marketing policy of construction companies. The purpose of the work is to conduct a marketing study of the situation on the residential real estate market in Zarechny, the Penza region, the results of which will allow construction companies to navigate the market and build a marketing strategy. *Materials and methods.* The research of the residential real estate market conjuncture in Zarechny, the Penza region, involves an analysis of supply, demand, as well as the influence of external factors on the development of the market. The methodological base of the study was made up of general scientific methods, methods of analysis of secondary data. The following research methods were used in the work: the method of analysis and synthesis, comparison and generalization of information, a systematic approach, the method of induction and deduction, secondary and primary marketing research. The information base of the study was the materials of Rosstat, Penzastat, the Ministry of Construction of Russia, legal documents, the results of scientific and marketing research of the real estate market, and the authors' own research. *Results.* As a result of the research, the territorial potential for the development of housing construction in ZATO, the city of Zarechny, Penza Region, was analyzed, the features of the demand for real estate and the factors influencing it, as well as the nature of the supply of residential real estate on the market and the current competitive environment, were determined. *Conclusions.* Despite the specifics of supply and demand, the presence of limiting factors, the Zarechny residential real estate market has growth potential, which makes it promising for construction companies.

Keywords: real estate market, marketing research, market conditions, closed administrative-territorial entity (ZATO)

For citation: Zinchenko S.V., Bijanova E.M. Assessment of the territorial potential for the development of housing construction in the municipality. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):87–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-6

Введение

По данным аналитиков, в Российской Федерации за 2021 г. было введено 92,5 млн кв. м жилья, что на 12,7 % больше, чем годом ранее [1]. В январе-сентябре 2022 г., по официальным данным Росстата, введено 79,1 млн кв. м жилья, что на 26,5 % или на 16,6 млн кв. м больше, чем за аналогичный период 2021 г. (рис. 1) [2].

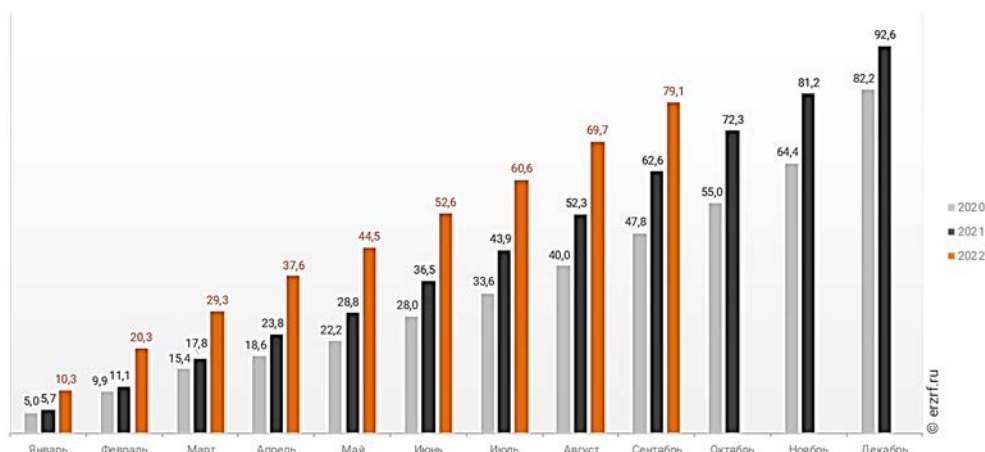


Рис. 1. Динамика ввода жилья накопленным итогом в Российской Федерации, млн кв. м (по данным Росстата) [2]

Чтобы оценить темпы жилищного строительства в российских регионах, экспертами агентства «РИА Рейтинг» по данным местных администраций и Росстата был составлен рейтинг по объемам ввода жилья, в котором регионы сравнивались по количеству квадратных метров жилья, введенного в определенном году на одного жителя. В рейтинг включены 100 населенных пунктов – административные центры субъектов Федерации и другие крупнейшие города России. Результаты рейтинга свидетельствуют, что в 2021 г. показатель объема ввода жилья на одного человека у лидирующих и отстающих регионов отличался в десятки раз. Более одного квадратного метра на человека введено в Ленинградской, Калининградской, Московской, Липецкой областях, Краснодарском крае, Тюменской и Сахалинской областях [3]. Можно отметить, что четыре из семи регионов наблюдаются в лидирующей группе и по результатам рейтинга 2022 г. [4]. В отчетах также отмечается рост темпов строительства и объемов продаж в 2021 г.

В 2022 г. рынок жилой недвижимости в Российской Федерации находился под влиянием различных факторов, в том числе геополитической и геоэкономической ситуации, что отразилось на объемах строительства и темпах продаж, потребительском поведении. Конъюнктура рынка жилой недвижимости продолжает сильно отличаться в зависимости от региона и влияет на маркетинговую деятельность строительных компаний, в том числе их товарно-ассортиментную политику, ценовую политику, политику распределения и политику продвижения. Целью данной работы является проведение маркетингового исследования конъюнктуры рынка жилой недвижимости закрытого административно-территориального образования (далее – ЗАТО) г. Заречного Пензенской области, результаты которого позволят строительным компаниям ориентироваться на рынке и выстроить маркетинговую стратегию работы.

Для достижения поставленной цели были изучены работы ученых: Е. Е. Макаровой, Е. Н. Сыщиковой, З. Б. Проскуриной; О. А. Землянского; В. Н. Бердниковой; Л. Н. Ясницкого, В. Л. Ясницкого, А. О. Алексева; И. А. Коростелкиной, Н. В. Воронковой; Б. Л. Ефремяна, В. С. Канхвы; Р. М. Нуреева, О. А. Гуляевой; В. Д. Марченко, В. В. Алтуниной, С. В. Корягина; Д. Д. Цыренова, Д. О. Жаповой, М. Б. Цыденово и др., касающиеся

исследования состояния рынка жилой недвижимости [5–13], большая часть которых направлена на выявление трендов развития рынка жилой недвижимости в Российской Федерации и в различных регионах страны в современных условиях, изучения изменения потребительского поведения и конкурентной среды. При этом работы по исследованию рынка жилой недвижимости в ЗАТО не представлены. Проанализированы работы А. И. Зверева, Д. М. Чернятиной, А. Г. Глебовой, В. Н. Зеленского, А. С. Лазаревой, С. Г. Белева, В. В. Ветеринарова, О. В. Сучковой, Д. Ю. Файкова, Д. Ю. Байдарова [14–19], в которых ЗАТО рассматриваются в контексте социально-экономического развития территории, исторического опыта их становления, выявления экономических проблем существования и дальнейшего развития. Исследователи отмечают, что особенности возникновения промышленных городов, в том числе и проектных атомных ЗАТО, определяют содержание их внутренней среды, ключевые пространственные и рыночные характеристики. Рынок жилой недвижимости ЗАТО также имеет особый характер спроса и предложения и находится под влиянием как общих факторов маркетинговой среды – политико-правовых, экономических, социально-культурных, технологических, демографических, природных, так и частных факторов, что обусловлено особым положением ЗАТО и делает исследование научно и практически значимым.

Материалы и методы

Закрытые административно-территориальные образования, первоначально предназначенные для рабочих, строящих предприятия атомной отрасли, сегодня являются крупными современными городами, имеющими особенности как социально-экономического развития, так и функционирования рынка недвижимости.

Город Заречный Пензенской области – один из таких городов. Это городской округ и город областного значения, который относится к ЗАТО «Росатома», что обусловлено нахождением на его территории градообразующего предприятия АО «Федеральный научно-производственный центр "Производственное объединение «Старт» имени М. В. Проценко"» [20]. Статус ЗАТО предполагает установление особого режима жизнедеятельности, включающего специальные условия проживания граждан [21] и регулирующегося Законом РФ «О закрытом административно-территориальном образовании» № 3297-1 от 14.07.1992 [22]. В настоящее время «Росатом» насчитывает десять ЗАТО – Железногорск (Красноярский край), Заречный (Пензенская область), Зеленогорск (Красноярский край), Лесной (Свердловская область), Новоуральск (Свердловская область), Озерск (Челябинская область), Саров (Нижегородская область), Северск (Томская область), Снежинск (Челябинская область) и Трехгорный (Челябинская область), которые имеют свои особенности и свою конъюнктуру рынка жилой недвижимости.

Исследование конъюнктуры рынка жилой недвижимости ЗАТО г. Заречного Пензенской области предполагает анализ предложения, спроса, а также влияния внешних факторов на развитие рынка.

Методологическую базу исследования составили общенаучные методы, методы анализа вторичных данных. В работе были использованы следующие методы исследования: метод анализа и синтеза, сравнения и обобщения

информации, системный подход, метод индукции и дедукции, вторичные и первичные маркетинговые исследования.

Информационной базой исследования послужили материалы Росстата, Пензастата, Минстроя, нормативно-правовые документы, в том числе регулирующие рынок недвижимости ЗАТО, результаты научных и маркетинговых исследований рынка недвижимости, а также собственные исследования авторов.

Результаты

На данный момент территория Заречного составляет 2761 га, при этом город застроен примерно на треть, на остальной части сохранены природные лесные массивы. Заречный расположен в 12 км к востоку от областного центра – г. Пензы. Границами городских земель ЗАТО г. Заречного Пензенской области являются: с юга и востока – границы Пензенского района; с запада и севера – границы г. Пензы. Заречный входит в систему Пензенской агломерации [23].

Рассмотрим территориальный потенциал развития жилищного строительства в городе. Градостроительная деятельность на территории Заречного осуществляется в соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации [24], Градостроительным уставом Пензенской области [25], документами территориального планирования и градостроительного зонирования. На показателях современного распределения территорий города между отдельными категориями и функциональными зонами отразились специфические особенности статуса ЗАТО, создание территории опережающего социально-экономического развития «Заречный» (далее – ТОСЭР «Заречный») и в целом политика социально-экономического развития Заречного. Характерной особенностью является высокий удельный вес территорий, занятых промышленными и коммунально-промышленными объектами, подъездными железнодорожными путями и городскими инженерными коммуникациями. В Стратегии социально-экономического развития ЗАТО г. Заречного Пензенской области до 2035 г. отмечается, что относительно невелика площадь неиспользуемых территорий в границах существующей застройки, но территория селитебной зоны имеет определенный резерв развития за счет грамотной уплотнительной застройки [26].

В целом анализ территориальных ресурсов Заречного показал, что город имеет ограниченную площадь территорий, благоприятных для жилищно-гражданского строительства. Это обусловлено тем, что значительная площадь городских земель находится в пределах санитарно-защитных зон, только 23 % намеченного объема жилищного строительства разместится в пределах существующей границы города, в основном на реконструируемых территориях, и будет соответствовать среднеэтажной и многоэтажной застройке. Однако в границах городской территории существует резерв для размещения дополнительных объемов жилищного строительства и развития других функциональных зон. Таким образом, перспективы появления новых проектов в центральной части города гораздо ниже, чем в сложившейся застроенной части Заречного.

Рассмотрим предложение жилой недвижимости на рынке Заречного и сложившуюся конкурентную среду. Оценка текущего строительства по состоянию на 2022 г. показала, что застройщики Пензенской области осуществляют строительство в пяти территориальных образованиях. При этом доля

строящихся жилых единиц в Заречном составляет 0,7 % от общего числа, незначительно опережая показатели таких городов Пензенской области, как Кузнецк и Каменка (табл. 1) [27]. Заречный имеет значительно превышающие показатели по плотности населения (2372,4 чел./кв. км) и в отличие от вышеобозначенных городов показывает стабильную динамику прироста численности населения.

Таблица 1

Объемы жилищного строительства Пензенской области по состоянию на первый квартал 2022 г. (составлено авторами)

Район / населенный пункт	Строящихся домов		Жилых единиц		Совокупная площадь жилых единиц	
	ед.	%	ед.	%	ед.	%
Пенза	68	77,3	17 045	84,0	896 706	83,7
Пензенский (Засечное)	13	14,8	2909	14,2	152 832	14,4
Заречный	2	2,3	138	0,7	8783	0,8
Кузнецк	2	2,3	92	0,5	6678	0,6
Каменский (Каменка)	3	3,3	118	0,6	5737	0,5
Итого:	88	100	20 302	100	1 070 736	100

На 2022 г. жилой фонд г. Заречного представлен 396 домами. Суммарное количество квартир – 20 368 шт. (рис. 2), 3203 из них были построены в течение последних 10 лет, что составляет 15,7 % от общего числа. Для сравнения – в областном центре и Пензенском районе данный показатель превышает это значение на 16,2 %. Если говорить об относительно «свежем» жилье со сроками ввода с 2018 г., то доля такого жилого фонда в Заречном составляет 5,7 %. Исходя из этих данных, можно судить об отсутствии достаточного объема современной жилой инфраструктуры, отвечающей последним тенденциям спроса на рынке жилой недвижимости.

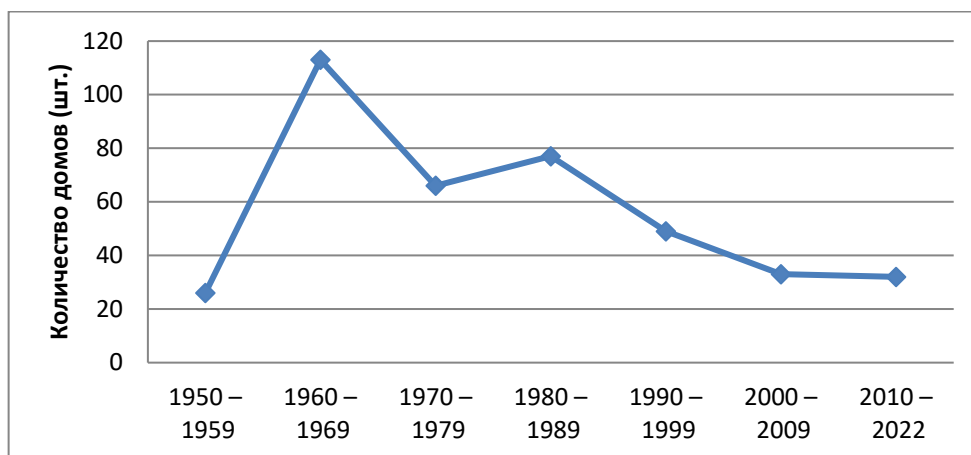


Рис. 2. Объем ввода многоквартирных домов (составлено авторами) [28]

В течение четырех последних лет в городе введено 71 210 кв. м жилья (табл. 2). Прослеживается спад объемов строительства с каждым годом. На рынке практически не появляется новых игроков. По мнению авторов, это может быть связано в том числе с меньшей привлекательностью локации и с меньшей доходностью проектов в сравнении с рынком г. Пензы. Традиционно недвижимость в Заречном дешевле, чем в областном центре, а аудитория достаточно чувствительна к изменению цены.

Таблица 2

Ввод жилья в ЗАТО г. Заречном Пензенской области (2018–2021) [28]

Годы	2018	2019	2020	2021
Ввод жилья, кв. м	32 665	12 415	14 371	11 759

Согласно исследованиям авторов, в 2022 г. в Заречном ведут работы два застройщика с использованием эскроу-счетов (табл. 3). Возводится 8,8 тыс. кв. м. Запланированный срок ввода – 2022 г. По данным аналитического отчета рынка жилой недвижимости, информации строительных компаний, в реализации у застройщиков находятся квартиры в следующих жилых комплексах (далее – ЖК) [29–32]:

- ЖК «SKY PARK» (застройщик – ООО СЗ «Ремстрой»);
- ЖК «Европейский» (застройщик – ООО СЗ «Градэк»).

Таблица 3

Реализуемые проекты в ЗАТО г. Заречном Пензенской области
(составлено авторами)

Наименование жилого комплекса, адрес	Застройщик	Информация о проекте	Транслируемые преимущества	Целевая аудитория
1	2	3	4	5
ЖК «Европейский», г. Заречный, ул. Восточная, 23	ООО СЗ «Градэк»	Класс жилья: стандарт; материал стен: кирпич; ввод в эксплуатацию: третий квартал 2022 г.; этажность: четырёхэтажный; средняя стоимость реализации за кв. м: от 53 000 руб.; тип отделки: без отделки; разнообразие планировочных решений: одно-, двух-, трехкомнатные квартиры стандартного формата	Расположение в тихом, уютном районе города, экологичность локации, тихий досуг; индивидуальное отопление, современные строительные материалы, светлые холлы, повышенный комфорт верхних этажей за счет скатной кровли	Молодые семьи и старшее поколение

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
ЖК «SKY PARK», г. Заречный, ул. Ленина, 55А/ЖД № 7	ООО СЗ «Ремстрой»	Класс жилья: комфорт; материал стен: монолит; ввод в эксплуатацию: второй квартал 2022 г.; этажность: 10-этажный; средняя стоимость реализации за кв. м: 46 500 руб.; тип отделки: без отделки; разнообразие планировочных решений: 1, 2, 3, 4-комнатные квартиры, стандартного и евро формата, в том числе двухуровневые с выходом на индивидуальную террасу; реализация квартир: 88 %	Современные технологии строительства, энерго-эффективность (энерго-сберегающие технологии класса А +), вентилируемый фасад, широко-форматные окна, горизонтальная система отопления с индивидуальными приборами учета, комплексное благоустройство с зонированием	Не указана

Среди перспективных проектов Заречного в 2022 г. также можно отметить следующие [30–32]:

1. ЖК «Европейский», застройщик – ООО СЗ «Градэк».
2. ЖК «Слава», застройщик – ООО СЗ «Энергоучет».
3. Проект многоквартирного жилого дома, застройщик – ООО СЗ «Гарант Строй Заказ».
4. Проект многоквартирного жилого дома (строение 8, 10-этажный жилой дом), застройщик – ООО СЗ «Ремстрой».

На рис. 3 представлено размещение реализуемых и перспективных проектов в ЗАТО г. Заречном Пензенской области.

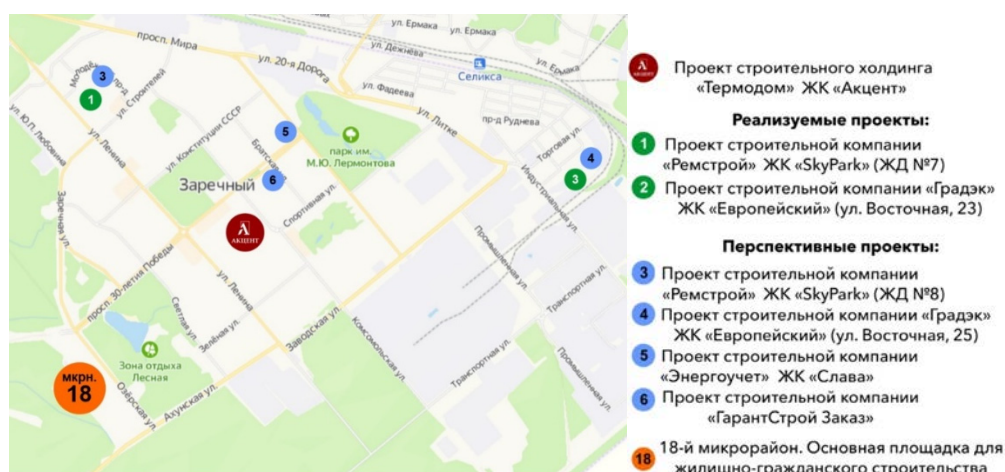


Рис. 3. Размещение реализуемых и перспективных проектов в ЗАТО г. Заречном Пензенской области в 2022 г. (составлено авторами)

Уровень цен на первичную недвижимость, представленную в базе данных о недвижимости «Циан», распределен согласно данным табл. 4. В настоящее время определяющим критерием ценообразования на рынке недвижимости Заречного является класс жилья, реализация современных строительных технологий, наполнение проекта.

Таблица 4

Предложение недвижимости на первичном рынке квартир
на второй квартал 2022 г. [29]

Категория квартир	Средняя стоимость за кв. м, руб.	Средняя стоимость квартиры, руб.	Средняя площадь, кв. м
Однокомнатные	51 711	2 030 236	39,3
Двухкомнатные	52 926	4 058 793	75,8
Трехкомнатные	52 802	4 307 070	81,3
Четырехкомнатные	47 759	6 962 713	146,2
Среднее значение по всем категориям	51 300	4 339 703	85,65

Чтобы оценить существующие предложения на вторичном рынке и сравнить его с первичным рынком квартир, были проанализированы данные портала «Циан» и выявлено следующее: объем предложения на первичном рынке меньше вторичного почти в два раза; реализация ведется как частными лицами, так и агентствами недвижимости; исходя из средних значений, можно отметить, что уровень цен на первичном рынке превышает вторичный на 16,6 %, если сравнивать аналогичные величины на рынке недвижимости г. Пензы, то разница составит 7,6 %. По мнению авторов, такой разрыв связан с тем, что вторичный рынок на сегодняшний день представлен преимущественно старым жилым фондом. Новые же проекты выглядят более привлекательно для покупателя даже при условии, что переехать в новую квартиру получится только после ввода дома в эксплуатацию, а также потребуются дополнительные затраты на ремонт, так как в стоимость новостроек не включена отделка.

На основе данных сервиса аналитики рынка жилищного строительства «Про дома» компании «ДОМ.РФ» (рис. 4) по данным на первый квартал 2022 г. в течение последних 12 месяцев было реализовано 88 квартир на первичном рынке, что составляет 7,33 шт./мес. [33].

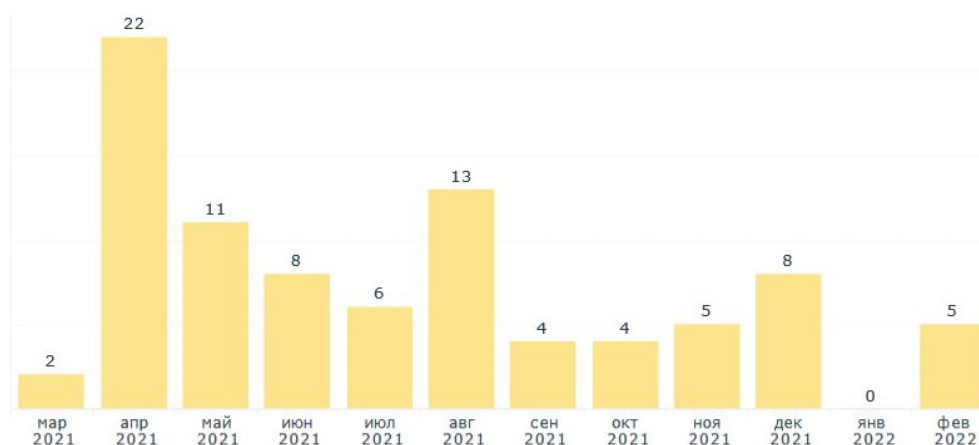


Рис. 4. Продажа жилых помещений в ЗАТО г. Заречном Пензенской области за период с марта 2021 г. по февраль 2022 г.

Учитывая, что данные по срокам реализации перспективных проектов неясны и объемы их предложений невелики, есть основание полагать, что в 2022–2023 гг. может возникнуть дефицит предложения на первичном рынке.

Далее рассмотрим особенности спроса на недвижимость и выявим факторы, на него влияющие. Численность населения города по статистическим данным в 2021 г. составляла 65 493 человека [21]. Среди десяти ЗАТО Госкорпорации «Росатом», в которые в том числе входят Железнодорожск, Зеленогорск, Северск, Лесной, Новоуральск, Озерск, Снежинск, Трехгорный, Саров, Заречный – самый маленький город по площади, но в то же время самый густонаселенный. Плотность населения составляет 2754 чел./кв.м [23]. Экономически активное население города составляет около 63 %, кроме того, город характеризуется достаточно молодым составом населения, средний возраст жителей – 42,6 лет [21]. В течение последних десяти лет можно отметить тенденцию прироста численности населения (табл. 5).

Таблица 5

Изменение численности населения ЗАТО г. Заречного [34]

Годы	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Кол-во жителей, человек	63 868	64 095	64 497	64 887	64 982	65 156	65 194	65 502	65 493

Структура населения по возрастным группам распределяется следующим образом [35]:

- моложе трудоспособного возраста – 15,5 % от всего населения;
- трудоспособного возраста – 55,6 %;
- старше трудоспособного возраста – 28,9 %.

При этом 22,9 % от всех пенсионеров города продолжают работать.

Миграционные потоки свидетельствуют о привлекательности территории города для жизни, развитой комфортной городской среде, безопасности, доступности учреждений дошкольного и дополнительного образования, что способствует привлечению жителей в город (табл. 6).

Таблица 6

Миграционные показатели [36]

Годы	2017	2018	2019	2020	2021
Миграционный прирост (+), убыль (–), человек	+311	+271	+554	+535	+492

Что касается доходов населения ЗАТО г. Заречного Пензенской области, то стоит отметить, что в 2021 г. они увеличились. Средняя номинальная заработная плата работников организаций города, не относящихся к субъектам малого предпринимательства (без учета организаций с численностью до 15 человек), за 2021 г. выросла на 7,6 % и составила 39 910,0 руб. [37]. Величина средней заработной платы в Заречном традиционно была выше, чем в целом по области. Так, по данным Пензастата, среднемесячная заработная плата работников за этот же период составила 36 030,6 руб. [38].

В целом данные по численности, структуре и доходах населения, миграционные показатели говорят о положительной тенденции для роста спроса на недвижимость в Заречном. Кроме того, рост спроса определяет и социально-

экономическая политика города. Так, Стратегией социально-экономического развития ЗАТО г. Заречного Пензенской области до 2035 г. определена миссия – «стать предпочтительным местом для жизни и деятельности людей, разделяющих общечеловеческие ценности, благодаря предоставлению им возможностей и созданию условий для реализации их талантов во всех видах человеческой активности, а также для комфортного проживания». Инструментом проектного управления стратегией выбран «истинный север», предполагающий точное определение конечной цели – увеличение доли населения города в возрасте от 0 до 55 лет до 60 % к 2035 г. В его основе лежит отказ от задач и трат, которые не работают на результат [26].

Потенциальное увеличение количества жителей города возможно за счет формирования ТОСЭР «Заречный», которая была создана с целью привлечения инвестиций постановлением Правительства Российской Федерации № 785 от 05.07.2018 [39] в соответствии с частью 1 статьи 3 Федерального закона № 473-ФЗ от 29 декабря 2014 г. «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации» [40]. ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли формируются как инструмент развития территорий, созданный для сохранения высокого качества жизни местного населения, благоприятного инвестиционного климата и обеспечения ускоренного социально-экономического развития города в целом.

В территорию ТОСЭР «Заречный» входят четыре производственных площадки, общая площадь которых составляет 211,3 га и которые расположены в производственной зоне г. Заречного (рис. 5).



Рис. 5. Схема расположения площадок ТОСЭР «Заречный» [41]

На 2022 г. в качестве резидентов ТОСЭР зарегистрировано 12 организаций. В целевых ориентирах Стратегии развития города до 2035 г. запланировано количество резидентов нарастающим итогом – 40 единиц, что естественно будет способствовать увеличению спроса на рынке недвижимости.

Особый статус ЗАТО для г. Заречного определяет свои условия проживания жителей, а также особенности функционирования рынка жилой недвижимости. С одной стороны, можно отметить, что многие потребители хотели бы купить квартиры в ЗАТО, так как в подобных городах отмечается низкий уровень преступности, нет нелегальных эмигрантов, достаточно тихо – попасть в город можно только по пропуску. Кроме того, развитие ТОСЭР «Заречный» предполагает формирование социальной инфраструктуры – строительство детских садов, школ и других образовательных учреждений, создание парков и других объектов. С другой стороны, сложности покупки недвижимости в ЗАТО ограничивают круг клиентов, существуют и ограничения на въезд и пребывание гостей, а также на покупку жилья [42, 43]. Так, согласно законодательству, приобретать недвижимость здесь имеют право лишь граждане, постоянно проживающие или получившие разрешение на постоянное проживание на территории ЗАТО либо работающие на предприятии, находящемся на этой территории [44].

Приобретение жилья допускается и посторонними лицами, но лишь по решению органов местного самоуправления, согласованному с федеральными исполнительными органами, в ведении которых находится город. Кроме того, существуют определенные ограничения в выборе банка для использования такого инструмента продаж, как ипотека. Связано это с ограниченным количеством организаций, предоставляющих ипотечные кредиты. Число их значительно меньше, чем, например, при реализации объектов в ипотеку в областном центре – г. Пензе. Возможно, это связано с менее привлекательным для банка предметом залога и особенностями аккредитации проекта.

Таким образом, несмотря на то, что Заречный относится к исключению среди областных муниципальных образований, здесь сохраняется положительная динамика прироста населения, повышения качества его жизни за счет формирования ТОСЭР «Заречный» и социально-экономической политики, есть существенный барьер, который ограничивает рост рынка жилой недвижимости, – статус ЗАТО, который влияет на количество потенциальных покупателей жилой недвижимости и связан с законодательными ограничениями.

Выводя проект на рынок недвижимости со специфическими административными факторами (ЗАТО), безусловно, строительные компании сталкиваются с некоторыми особенностями спроса, обусловленными законодательными ограничениями на покупку недвижимости. Учитывая, кто может стать потенциальным покупателем на рынке жилой недвижимости ЗАТО, авторами в табл. 7 предлагается вариант сегментации целевой аудитории, который определяется поведенческими факторами потенциальных покупателей и напрямую связан с их финансовыми возможностями, составом и размером семьи, географией проживания и работы, отражает мотивы покупки и критерии выбора.

Таблица 7

Сегменты целевой аудитории на рынке жилой недвижимости ЗАТО
г. Заречного Пензенской области (составлено авторами)

Критерии	Студенты	Одинокие люди	Молодожены	Пары без детей	Семьи с детьми младшего возраста	Семьи с детьми старшего школьного возраста	Пожилые люди
1	2	3	4	5	6	7	8
Возраст	18–25 лет	25–35 лет	20–30 лет	25–35 лет	25–35 лет	27–45 лет	Старше 55 лет
Доход	От 0 (живут за счет родителей) до 25 000 руб., в среднем 5000 – 10 000 (стипендия + подработка)	От 30 000 руб.	От 40 000 руб. на семью	От 40 000 руб. на семью	От 35 000 руб. на семью и больше, возможно есть материнский капитал	От 40 000 руб. на семью и больше, возможно есть материнский капитал	Пенсия + сбережения + материальная помощь от детей
Состав и размер семьи	Живут с родителями или недалеко от них, зависят от них материально	Живет один/одна; периодически общается с родителями, но не зависит от них материально, семью не торопится создавать / в разводе	Собираются пожениться или недавно поженились, есть нестарые родители	Пара; живут с родителями и хотят от них съехать / снимают квартиру / живут в отдельной квартире, но она их не устраивает, детей нет, но планируются	Пара с одним или двумя детьми дошкольного или младшего школьного возраста; живут с родителями и хотят съехать / на съемной квартире / в собственности, но она их не устраивает	Пара с одним ребенком-школьником или двумя-тремя детьми	Есть дети и внуки, живут вместе с ними или недалеко от них

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8
География проживания/ работы	г. Заречный	г. Заречный, г. Пенза, Пензенская область					
Учеба	Университет						
Работа	Университет Сфера обслуживания (промоутер, официант и др.), стажировки	Служащие, руководители отделов и компаний, предприниматели (работе уделяют много времени и сил)	Университет Сфера обслуживания или служащие, предприниматели (в зависимости от возраста)	Служащие, руководители отделов и компаний, предприниматели	Папы – служащие, руководители отделов и компаний, предприниматели мамы – в декретном отпуске / работают (служащие, руководители), много времени, сил и средств уделяют детям	Служащие, руководители отделов и компаний, предприниматели	Пенсионеры, возможно продолжают работать (как хорошие специалисты) или находят подработку (вахтеры, сторожи и т.п.)
Хобби, отдых и развлечения	Фото, гаджеты, посещение развлекательных мероприятий, спортивных учреждений	Самообразование, активный отдых и спорт, путешествия	Самообразование, активный отдых и спорт, путешествия	Активный отдых, встречи с друзьями, посещение концертов, путешествия	Связаны с детьми	Связаны с детьми	Готовят, вяжут, сажают цветы, заботятся о дачном участке, рыбачат, читают газеты и журналы, смотрят телевизор

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8
Мотив покупки	Стать независимым, съехать от родителей	Улучшить жилищные условия, получить собственную квартиру	Собственное жилье для молодой семьи	Съехать от родителей, улучшить жилищные условия	Увеличить жилую площадь, съехать от родителей	Увеличить жилую площадь, съехать от родителей	Купить квартиру для детей, внуков / для себя с целью переезда ближе к детям
Покупатель квартиры (принимает решение о покупке)	Родители на собственные и заемные средства (ипотека)	Покупают сами на собственные средства, возможно с небольшой поддержкой родителей или частично на заемные средства (ипотека)	Родители, родители и дети вместе на собственный или заемный капитал (ипотека), реже покупают сами на собственные средства	Покупают сами на собственные средства, возможно с небольшой поддержкой родителей или частично на заемные средства (ипотека)	Покупают сами на собственные средства или на заемные средства (ипотека, материнский капитал)	Покупают сами на собственные средства или на заемные средства (ипотека, материнский капитал)	Покупают сами; учитывают пожелания детей и внуков; тратят собственные средства

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8
Критерии выбора квартиры	Стоймость, удаленность от родителей, хороший район, транспортная доступность	Хороший район и дом, соотношение цены и качества застройки, желание жить ближе к месту работы	Приемлемые цены, качество строительства, инфраструктура, удаленность от работы, супругов, удаленность от родителей, хороший район	Выгодная цена, качество строительства, развитая инфраструктура	Приемлемая цена, развитая инфраструктура, садик и школа в шаговой доступности, качество строительства, безопасность	Цена и качество, развитая инфраструктура (доступность школы и мест для детского досуга), возможно будут искать новое жилье недалеко от старого, чтобы ребенку не пришлось менять школу	Доступная цена, транспортная доступность, ежемесячные расходы на квартиру, инфраструктура (все необходимые объекты в шаговой доступности)
Какие квартиры подойдут лучше всего	Студии и однокомнатные	Однокомнатные, двухкомнатные (небольшие)	Двухкомнатные	Двухкомнатные	Двухкомнатные, трехкомнатные	Двухкомнатные, трехкомнатные, четырехкомнатные	Однокомнатные, двухкомнатные (небольшие)

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8
Точки контакта	Концерты популярных групп (молодежные мероприятия); места около университетов (кафе, магазины); центр города; парки; кафе; общественный транспорт; торговые центры; социальные сети	Новостные сайты Заречного и Пензы; бизнес- журналы; выставки и концерты; клубы активных видов спорта; торговые центры; кафе и рестораны; социальные сети	Свадебные салоны; сайты (сообщества) свадебной тематики; журналы свадебной тематики; кафе и рестораны; парки; центр города; развлекательные центры; кинотеатры; социальные сети	Торговые центры; центр города; загородные базы отдыха; радио (слушают в машине); торговые центры, в Заречном и Пензе; социальные сети, информационные порталы	Пенсионный фонд (место выдачи материнского капитала); женские консультации; детские сады, студии развития, магазины, парки, игровые комнаты, зоопарк, торговые центры, радио; телевидение; социальные сети, информационные порталы	Кафе и рестораны; загородные базы отдыха; турагентства; социальные сети; информационные порталы; радио; телевидение; журналы и газеты; торговые центры	Дачные массивы (остановки автобусов дачных направлений, рекламные щиты); газеты и журналы с программой телепередач, для рыболовов, дачников и т.п.; торговые центры, магазины шаговой доступности; концертные залы; региональные телеканалы

Обсуждение и выводы

В настоящее время в России рынок недвижимости как инструмент инвестиций и драйвер экономики оказался в центре внимания власти, бизнеса и потребителей. Льготная ипотека, снижение административных барьеров, кредиты, весь спектр мер в поддержку отечественных девелоперов сегодня заложил фундамент для устойчивого развития отрасли. При этом самим строительным компаниям для поддержания конкурентоспособности необходимо исследовать конъюнктуру рынка.

Маркетинговое исследование конъюнктуры рынка жилой недвижимости закрытого административно-территориального образования г. Заречного Пензенской области показало следующее:

1. Город имеет ограниченную площадь территорий, благоприятных для жилищно-гражданского строительства, что определяется наличием санитарно-защитных зон и существующей застройкой. Перспективы появления новых проектов в центральной части города гораздо ниже, чем в сложившейся застроенной части Заречного. По прогнозам экспертов, 23 % планируемого объема жилищного строительства будет среднеэтажной и многоэтажной застройки и разместится в пределах существующей границы города, на реконструируемых территориях.

2. На данный момент в Заречном отсутствует достаточный объем современной жилой инфраструктуры, отвечающей потребительскому спросу, прослеживается спад объемов строительства из года в год, отмечается отсутствие новых игроков на рынке, что может быть связано с меньшей привлекательностью локации и доходностью проектов в сравнении с рынком г. Пензы. В 2022–2023 гг. может возникнуть дефицит предложения на первичном рынке.

3. Заречный – самый маленький город по площади, но в то же время самый густонаселенный среди десяти ЗАТО Госкорпорации «Росатом». В последние годы в нем отмечается прирост населения и его доходов, что свидетельствует о привлекательности территории для жизни и положительной тенденции для роста спроса на недвижимость в городе. Во многом это определяется социально-экономической политикой развития города и формированием ТОСЭР «Заречный». Влияет на спрос на недвижимость и особый характер сделок по покупке жилья, позволяющий вывить целевые сегменты покупателей.

Анализируя приведенные выше данные о территориальном потенциале города для строительства, имеющейся застройке, численности населения, его составе и динамике прироста, уровне доходов, порядке приобретения недвижимости, конкурентной среде, можно отметить, что несмотря на наличие ограничивающих факторов, у рынка жилой недвижимости Заречного есть потенциал роста, который делает его перспективным для работы строительных компаний.

Список литературы

1. За 2021 год в России введено 92,6 млн кв. метров жилья // Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/za-2021-god-v-rossii-vvedeno-92-6-mln-kv-metrov-zhilya> (дата обращения: 15.09.2022).
2. Рейтинг городов России по объемам ввода жилья – 2021 // РИА Рейтинг. URL: <https://riarating.ru/infografika/20210817/630206277.html> (дата обращения: 15.09.2022).

3. Росстат: ввод жилья в России за январь-сентябрь 2022 года вырос на 26,5 % (графики) // Единый ресурс застройщиков. URL: <https://erzrf.ru/news/rosstat-vvod-zhilya-v-rossii-za-yanvar-sentyabr-2022-goda-vyros-na-265-grafiki?tag=%D0%D0%B2%D0%BE%D0%B4%20%D0%B6%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%8F> (дата обращения: 20.12.22).
4. Рейтинг городов России по объемам ввода жилья – 2022 // РИА Рейтинг. URL: <https://riarating.ru/infografika/20220808/630226990.html> (дата обращения: 15.09.2022).
5. Макарова Е. Е., Сыщикова Е. Н., Проскурина З. Б. Современное состояние рынка недвижимости России в условиях цифровой экономики // Наука Красноярья. 2021. № 3. doi: 10.12731/2070-7568-2021-10-3-71-86
6. Землянский О. А. Анализ рынка недвижимости для предпринимательской деятельности // Вестник Государственного университета управления. 2021. № 5. doi: 10.26425/1816-4277-2021-5-60-6
7. Бердникова В. Н. Методы государственного регулирования рынка недвижимости в России в период кризиса // Вестник Челябинского государственного университета. 2021. № 12. doi: 10.47475/1994-2796-2021-11204
8. Ясницкий Л. Н., Ясницкий В. Л., Алексеев А. О. Моделирование рынков жилой недвижимости крупнейших городов России // Экономика региона. 2022. Т. 18, вып. 2. С. 609–622. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-2-22
9. Коростелкина И. А., Воронкова Н. В. Рынок недвижимости в период пандемии: современные тренды и прогнозы // Тренды и управление. 2021. № 1. doi: 10.7256/2454-0730.2021.1.33906
10. Ефремян Б. Л., Канхва В. С. Перераспределение приоритетов в управлении рисками в жилищном строительстве в условиях последствий внешних шоков // Вестник Московского государственного строительного университета. 2022. Т. 17, вып. 6. С. 756–768. doi: 10.22227/1997-0935.2022.6.756-768
11. Нуреев Р. М., Гуляева О. А. Недвижимость домашних хозяйств: институциональный анализ // Terra Economicus. 2021. № 19. С. 39–57. doi: 10.18522/2073-66062021-19-2-39-57
12. Марченко В. Д., Алтунина В. В., Корягин С. В. Особенности формирования и развития регионального рынка жилья на примере Калининградской области // Технико-технологические проблемы сервиса. 2021. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-i-razvitiya-regionalnogo-rynka-zhilya-na-primere-kaliningradskoy-oblasti> (дата обращения: 16.12.2022).
13. Цыренов Д. Д., Жапова Д. О., Цыденов М. Б. Рынок жилой недвижимости в Дальневосточном федеральном округе: тенденции и перспективы // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2021. № 2. С. 90–95. doi: 10.18101/2304-4446-2021-2-90-95
14. Зверев А. И. Особенности закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО) в контексте социологии города // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Социология. Педагогика. Психология. 2022. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-zakrytyh-administrativno-territorialnyh-obrazovaniy-zato-v-kontekste-sotsiologii-goroda> (дата обращения: 20.12.2022).
15. Чернятин Д. М. Реструктуризация как основа конкурентоспособности градообразующих предприятий ЗАТО Госкорпорации «РОСАТОМ» // Региональные проблемы преобразования экономики. 2019. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/restrukturizatsiya-kak-osnova-konkurentosposobnosti-gradoobrazuyuschih-predpriyatiy-zato-goskorporatsii-rosatom> (дата обращения: 15.09.2022).
16. Глебова А. Н., Зеленский В. Н., Лазарева А. С. Проблемы моногородов: мировой опыт и российская практика // Вестник университета. 2022. № 11. С. 86–93. doi: 10.26425/1816-4277-2022-11-86-93

17. Белев С. Г., Ветеринаров В. В., Сучкова О. В. Территории опережающего развития и производительность в российских городах // Экономический журнал ВШЭ. 2021. № 25. С. 9–41. doi: 10.17323/1813-8691-2021-25-1-9-41
18. Файков Д. Ю., Байдаров Д. Ю. Учет особенностей закрытых атомных городов в стратегиях социально-экономического развития разного уровня // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. 2022. № 4. doi: 10.24412/2071-6435-2022-4-28-48
19. Файков Д. Ю., Байдаров Д. Ю. Новый подход к развитию закрытых атомных городов // Регионалистика. 2021. Т. 8, № 4. С. 22–35. doi: 10.14530/reg.2021.4.22
20. АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко». URL: <https://www.startatom.ru> (дата обращения: 08.09.2022).
21. О Заречном // Официальный сайт Администрации ЗАТО г. Заречного Пензенской области. URL: <http://www.zarechny.zato.ru/o-zarecnom> (дата обращения: 08.09.2022).
22. О закрытом административно-территориальном образовании : закон РФ № 3297-1 от 14.07.1992. URL: <https://base.garant.ru/10108046> (дата обращения: 08.09.2022).
23. Объединенный портал закрытых административно-территориальных образований РФ. URL: <https://zato.tv/zarechny> (дата обращения: 08.09.2022).
24. Градостроительный кодекс Российской Федерации № 190-ФЗ от 29.12.2004 : [ред. от 14.07.2022] ; [с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2022] // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040 (дата обращения: 05.09.2022).
25. Градостроительный устав Пензенской области : закон Пензенской области № 1164-ЗПО от 14 ноября 2006 г. URL: <https://base.garant.ru/17409912/#friends> (дата обращения: 05.09.2022).
26. Стратегия социально-экономического развития ЗАТО город Заречный Пензенской области до 2035 г. // Официальный сайт Администрации ЗАТО г. Заречного Пензенской области. URL: <http://www.zarechny.zato.ru/o-zarecnom/strategiceskoe-razvitiye-goroda/strategia-2035> (дата обращения: 08.09.2022).
27. Аналитический обзор 2022 // Единый реестр застройщиков. URL: <https://erzrf.ru/images/repfle/21323792001REPFLE.pdf> (дата обращения: 11.12.2022).
28. Официальный сайт Аналитики рынка жилищного строительства. URL: <https://продома.дом.рф/pa/landing> (дата обращения: 11.08.2022).
29. Официальный сайт базы данных недвижимости «Циан». URL: <https://penza.cian.ru> (дата обращения: 11.08.2022).
30. Официальный сайт застройщика «Градэк». URL: <https://evropa58.ru> (дата обращения: 11.12.2022).
31. Официальный сайт застройщика «Ремстрой». URL: <https://www.rem-str.ru> (дата обращения: 11.12.2022).
32. Официальный сайт застройщика «Энергоучет». URL: <https://slavodom.ru> (дата обращения: 11.12.2022).
33. ДОМ.РФ. URL: <https://дом.рф> (дата обращения: 11.12.2022).
34. Витрина статистических данных // Росстат. URL: <https://showdata.gks.ru/report/278928> (дата обращения: 08.09.2022).
35. Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту // Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284> (дата обращения: 08.09.2022).
36. Численность и миграция населения Российской Федерации // Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13283> (дата обращения: 08.09.2022).
37. Рынок труда, занятость и заработная плата // Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/labor_market_employment_salaries (дата обращения: 06.09.2022).
38. Заработная плата // Пензастат. URL: <https://pnz.gks.ru/wage> (дата обращения: 08.09.2022).

39. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.07.2018 № 785 // Атом-TOP. URL: <https://atomtor.ru/wp-content/uploads/2018/07/Постановление-о-создании-ТОСЭР-Заречный.pdf> (дата обращения: 08.09.2022).
40. О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации : федер. закон № 473-фз от 29 декабря 2014 года. URL: <https://atomtor.ru/wp-content/uploads/2017/06/Федеральный-закон-от-29.12.2014-года-№-473-ФЗ.pdf> (дата обращения: 08.09.2022).
41. Характеристика площадок Заречный // Атом-TOP. URL: <https://atomtor.ru/zarinfo/> (дата обращения: 05.09.2022).
42. Прелести и недостатки жизни в закрытых городах // Russian Realty. URL: <https://www.russianrealty.ru/analytic/articles/companies/615722/> (дата обращения: 15.08.2022).
43. Жизнь в ЗАТО: почему люди стремятся в закрытые города // Большой сервер недвижимости. URL: https://www.bsn.ru/news/market/spb/33705_zhizn_v_zato_pochemu_lyudi_stremyatsya_v_zakrytye_goroda/ (дата обращения: 15.08.2022).
44. Об утверждении Административного регламента Администрации города Заречного Пензенской области по предоставлению муниципальной услуги «Выдача разрешений на покупку (дарение) квартиры для постоянного проживания на территории ЗАТО г. Заречный Пензенской области» : постановление Администрации города Заречного № 1055 от 08.06.2015 // Официальный сайт Администрации ЗАТО г. Заречный Пензенской области. URL: http://www.zarechny.zato.ru/npd/normativno-pravovye-dokumenty?field_doc_date_value%5Bvalue%5D%5Bmonth%5D=&field_doc_date_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&doc_number=1055 (дата обращения: 11.12.2022).

References

1. 92.6 million square meters of housing were commissioned in Russia in 2021. *Minstroy Rossii = Ministry of Construction of Russia*. (In Russ.). Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/za-2021-god-v-rossii-vvedeno-92-6-mln-kv-metrov-zhilya> (accessed 15.09.2022).
2. Rating of Russian cities in terms of housing commissioning – 2021. *RIA Reyting = RIA Rating*. (In Russ.). Available at: <https://riarating.ru/info-grafika/20210817/630206277.html> (accessed 15.09.2022).
3. Rosstat: housing commissioning in Russia in January-September 2022 increased by 26.5% (graphs). *Edinyy resurs zastroyshchikov = Unified resource of developers*. (In Russ.). Available at: <https://erzrf.ru/news/rosstat-vvod-zhilya-v-rossii-za-yanvar-sentyabr-2022-goda-vyros-na-265-grafiki?tag=%D0%92%D0%B2%D0%BE%D0%B4%20%D0%B6%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%8F> (accessed 20.12.22).
4. Rating of Russian cities in terms of housing commissioning – 2022. *RIA Reyting = RIA Rating*. (In Russ.). Available at: <https://riarating.ru/infografika/20220808/630226990.html> (accessed 15.09.2022).
5. Makarova E.E., Syshchikova E.N., Proskurina Z.B. The current state of the Russian real estate market in the digital economy. *Nauka Krasnoyarsk'ya = Science of Krasnoyarsk*. 2021;(3). (In Russ.). doi: 10.12731/2070-7568-2021-10-3-71-86
6. Zemlyanskiy O.A. Analysis of the real estate market for entrepreneurial activity. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta upravleniya = Bulletin of the State University of Management*. 2021;(5). (In Russ.). doi: 10.26425/1816-4277-2021-5-60-6
7. Berdnikova V.N. Methods of state regulation of the real estate market in Russia during the crisis. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2021;(12). (In Russ.). doi: 10.47475/1994-2796-2021-11204
8. Yasnitskiy L.N., Yasnitskiy V.L., Alekseev A.O. Modeling of residential real estate markets in the largest cities of Russia. *Ekonomika regiona = The economy of the region*. 2022;18(2):609–622. (In Russ.). doi: 10.17059/ekon.reg.2022-2-22

9. Korostelkina I.A., Voronkova N.V. The real estate market during the pandemic: modern trends and forecasts. *Trendy i upravlenie = Trends and management*. 2021;(1). (In Russ.). doi: 10.7256/2454-0730.2021.1.33906
10. Efremyan B.L., Kankhva V.S. Redistribution of priorities in risk management in housing construction in the conditions of consequences of external shocks. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta = Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering*. 2022;17(6):756–768. (In Russ.). doi: 10.22227/1997-0935.2022.6.756-768
11. Nureev R.M., Gulyaeva O.A. Household real estate: institutional analysis. *Terra Economicus*. 2021;(19):39–57. (In Russ.). doi: 10.18522/2073-66062021-19-2-39-57
12. Marchenko V.D., Altunina V.V., Koryagin S.V. Features of the formation and development of the regional housing market on the example of the Kaliningrad region. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa = Technical and technological problems of service*. 2021;(1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-i-razvitiya-regionalnogo-rynka-zhilya-na-primere-kaliningradskoy-oblasti> (accessed 16.12.2022).
13. Tsyrenov D.D., Zhapova D.O., Tsydenov M.B. Residential real estate market in the Far Eastern Federal District: trends and prospects. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment = Bulletin of the Buryat State University. Economics and Management*. 2021;(2):90–95. (In Russ.). doi: 10.18101/2304-4446-2021-2-90-95
14. Zverev A.I. Features of closed administrative-territorial formations (BUT) in the context of the sociology of the city. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Sotsiologiya. Pedagogika. Psikhologiya = Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Sociology. Pedagogy. Psychology*. 2022;(1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-zakrytyh-administrativno-territorialnyh-obrazovaniy-zato-v-kontekste-sotsiologii-goroda> (accessed 20.12.2022).
15. Chernyatin D.M. Restructuring as the basis of competitiveness of the city-forming enterprises of the State Corporation "ROSATOM". *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki = Regional problems of economic transformation*. 2019;(12). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/restrukturizatsiya-kak-osnovak Konkurentosposobnosti-gradoobrazuyuschih-predpriyatiy-zato-goskorporatsii-rosatom> (accessed 15.09.2022).
16. Glebova A.N., Zelenskiy V.N., Lazareva A.S. Problems of single-industry towns: world experience and Russian practice. *Vestnik universiteta = Bulletin of the University*. 2022;(11):86–93. (In Russ.). doi: 10.26425/1816-4277-2022-11-86-93
17. Belev S.G., Veterinarov V.V., Suchkova O.V. Territories of advanced development and productivity in Russian cities. *Ekonomicheskij zhurnal VShE = HSE Economic Journal*. 2021;(25):9–41. (In Russ.). doi: 10.17323/1813-8691-2021-25-1-9-41
18. Faykov D.Yu., Baydarov D.Yu. Taking into account the features of closed nuclear cities in the strategies of socio-economic development of different levels. *ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika = STAGE: economic theory, analysis, practice*. 2022;(4). (In Russ.). doi: 10.24412/2071-6435-2022-4-28-48
19. Faykov D.Yu., Baydarov D.Yu. A new approach to the development of closed nuclear cities. *Regionalistika = Regionalistics*. 2021;8(4):22–35. (In Russ.). doi: 10.14530/reg.2021.4.22
20. AO FNPTs «PO «Start» im. M.V. Protsenko» = JSC FNPC "PO "Start" named after M.V. Protsenko". (In Russ.). Available at: <https://www.startatom.ru> (accessed 08.09.2022).
21. About Zarechny. *Ofitsial'nyy sayt Administratsii ZATO g. Zarechnogo Penzenskoy oblasti = Official website of the Administration of the city of Zarechny, Penza region*. (In Russ.). Available at: <http://www.zarechny.zato.ru/o-zarecnom> (accessed 08.09.2022).

22. *O zakrytom administrativno-territorial'nom obrazovanii: zakon RF № 3297 1 ot 14.07.1992 = On closed administrative-territorial entity : RF Law No. 3297 1 of 14.07.1992.* (In Russ.). Available at: <https://base.garant.ru/10108046> (accessed 08.09.2022).
23. *Ob"edinennyy portal zakrytykh administrativno-territorial'nykh obrazovaniy RF = United portal of closed administrative-territorial entities of the Russian Federation.* (In Russ.). Available at: <https://zato.tv/zarechnyy> (accessed 08.09.2022).
24. Town-planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ of 29.12.2004 : [ed. dated 14.07.2022] ; [with amendments and additions, intro. effective from 01.09.2022]. *ConsultantPlus*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040 (accessed 05.09.2022).
25. *Gradostroitel'nyy ustav Penzenskoy oblasti: zakon Penzenskoy oblasti № 1164-ZPO ot 14 noyabrya 2006 g. = Town-planning charter of the Penza region: Law of the Penza region No. 1164-PO of November 14, 2006.* (In Russ.). Available at: <https://base.garant.ru/17409912/#friends> (accessed 05.09.2022).
26. The strategy of socio-economic development of the city of Zarechny, Penza region until 2035. *Ofitsial'nyy sayt Administratsii ZATO g. Zarechnogo Penzenskoy oblasti = Official website of the Administration of the city of Zarechny, Penza region.* (In Russ.). Available at: <http://www.zarechny.zato.ru/o-zarecnom/strategiceskoe-razvitie-goroda/strategia-2035> (accessed 08.09.2022).
27. Analytical review 2022. *Edinyy reestr zastroyschikov = Unified Register of Developers.* (In Russ.). Available at: <https://erzrf.ru/images/repfle/21323792001REPFILE.pdf> (accessed 11.12.2022).
28. *Ofitsial'nyy sayt Analitiki rynka zhilishchnogo stroitel'stva = The official website of the housing construction market Analytics.* (In Russ.). Available at: <https://prodoma.dom.rf/pa/landing> (accessed 11.08.2022).
29. *Ofitsial'nyy sayt bazy dannykh nedvizhimosti «Tsian» = The official website of the real estate database "Cian".* (In Russ.). Available at: <https://penza.cian.ru> (accessed 11.08.2022).
30. *Ofitsial'nyy sayt zastroyschika «Gradek» = Official website of the developer "Gradek".* (In Russ.). Available at: <https://evropa58.ru> (accessed 11.12.2022).
31. *Ofitsial'nyy sayt zastroyschika «Remstroy» = The official website of the developer "Remstroy".* (In Russ.). Available at: <https://www.rem-str.ru> (accessed 11.12.2022).
32. *Ofitsial'nyy sayt zastroyschika «Energouchet» = Official website of the developer "Energouchet".* (In Russ.). Available at: <https://slavodom.ru> (accessed 11.12.2022).
33. *DOM.RF.* (In Russ.). Available at: <https://dom.rf> (accessed 11.12.2022).
34. Showcase of statistical data. *Rosstat.* (In Russ.). Available at: <https://showdata.gks.ru/report/278928> (accessed 08.09.2022).
35. Population of the Russian Federation by gender and age. *Rosstat.* (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284> (accessed 08.09.2022).
36. Population and migration of the Russian Federation. *Rosstat.* (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13283> (accessed 08.09.2022).
37. Labor market, employment and wages. *Rosstat.* (In Russ.). Available at: https://rosstat.gov.ru/labor_market_employment_salaries (accessed 06.09.2022).
38. Salary. *Penzastat.* (In Russ.). Available at: <https://pnz.gks.ru/wage> (accessed 08.09.2022).
39. Decree of the Government of the Russian Federation No. 785 dated 05.07.2018. *AtomTOR.* (In Russ.). Available at: <https://atomtor.ru/wp-content/uploads/2018/07/Postanovlenie-o-sozdanii-TOSER-Zarechnyy.pdf> (accessed 08.09.2022).
40. *O territoriyakh operezhayushchego sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossiyskoy Federatsii: feder. zakon № 473-fz ot 29 dekabrya 2014 goda = On territories of advanced socio-economic development in the Russian Federation : feder. Law No. 473-fz of December 29, 2014.* (In Russ.). Available at: <https://atomtor.ru/wp->

content/uploads/2017/06/Federal'nyy-zakon-ot-29.12.2014-goda-№-473-FZ.pdf (accessed 08.09.2022).

41. Characteristics of the Zarechny sites. *Atom-TOR*. (In Russ.). Available at: <https://atomtor.ru/zarinfo/> (accessed 05.09.2022).
42. The charms and disadvantages of living in closed cities. *Russian Realty*. (In Russ.). Available at: <https://www.russianrealty.ru/analytic/articles/companies/615722/> (accessed 15.08.2022).
43. Life in BUT: why people tend to closed cities. *Bol'shoy server nedvizhimosti = Big real estate server*. (In Russ.). Available at: https://www.bsn.ru/news/market/spb/33705_zhizn_v_zato_pochemu_lyudi_stremyatsya_v_zakrytye_goroda/ (accessed 15.08.2022).
44. On approval of the Administrative Regulations of the Administration of the city of Zarechny of the Penza region for the provision of municipal services "Issuance of permits for the purchase (donation) of apartments for permanent residence in the territory of the city of Zarechny of the Penza region" : resolution of the Administration of the city of Zarechny No. 1055 of 08.06.2015. *Ofitsial'nyy sayt Administratsii ZATO g. Zarechnyy Penzenskoy oblasti = Official website of the Administration of the city of Zarechny of the Penza region*. (In Russ.). Available at: http://www.zarechny.zato.ru/npd/normativno-pravovye-dokumenty?field_doc_date_value%5Bvalue%5D%5Bmonth%5D=&field_doc_date_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&doc_number=1055 (accessed 11.12.2022).

Информация об авторах / Information about the authors

Светлана Владимировна Зинченко

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

Svetlana V. Zinchenko

Candidate of economical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of marketing,
commerce and service,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Евгения Михайловна Бижанова

кандидат экономических наук,
доцент кафедры маркетинга, коммерции
и сферы обслуживания,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: janette@list.ru

Evgenia M. Bijanova

Candidate of economical sciences,
associate professor of the sub-department
of marketing, commerce and service,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 20.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.02.2023

Принята к публикации/Accepted 21.03.2023

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 004.89

doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-7

МЕТОД ВЕТВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Е. А. Додонова¹, И. Н. Дубинина²,
О. К. Головнин³, А. В. Иващенко⁴

^{1, 2} ООО «Открытый код», Самара, Россия

³ Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, Самара, Россия

⁴ Самарский государственный медицинский университет Министерства
здравоохранения Российской Федерации, Самара, Россия

¹ dodonova.evg@gmail.com, ² vartaric@yandex.ru,

³ golovnin@ssau.ru, ⁴ anton.ivashenko@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе приводится новый метод ветвления временной шкалы в системах мониторинга и моделирования, с помощью которого определяется необходимое и достаточное количество информации для принятия решений путем разбиения рассматриваемой ситуации на ветви с положительным, отрицательным и нейтральным сценариями развития сложной организационной системы, что позволяет повысить точность прогноза. *Материалы и методы.* Решение основано на теории взаимно-корреляционного анализа неэквидистантных временных рядов, применение которой позволяет обрабатывать цепочки событий для определения возможных причинно-следственных связей. Метод ветвления временной шкалы состоит из следующих этапов: генерация ветвей, аппроксимация и адаптивная дискретизация. *Результаты.* Предложенный метод реализован и апробирован с целью анализа накопленной статистики в здравоохранении по ключевым параметрам «Количество новых заражений» и «Доступность медицинского обеспечения для больных COVID». *Выводы.* Предлагаемый метод позволяет идентифицировать критические ситуации, которые являются важными элементами в планировании, так как они могут быть использованы для совершенствования процесса поддержки принятия решений.

Ключевые слова: цифровая трансформация, социальная система, мониторинг, управление рисками, временные ряды, поддержка принятия решений

Для цитирования: Додонова Е. А., Дубинина И. Н., Головнин О. К., Иващенко А. В. Метод ветвления временной шкалы для моделирования развития ситуации в системе цифрового мониторинга здравоохранения // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 111–127. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-7

TIME SCALE BRANCHING METHOD FOR THE SITUATION DEVELOPMENT SIMULATION IN THE DIGITAL HEALTHCARE MONITORING SYSTEM

**E.A. Dodonova¹, I.N. Dubinina²,
O.K. Golovnin³, A.V. Ivashchenko⁴**

^{1, 2} LLC «Open code», Samara, Russia

³ Samara National Research University, Samara, Russia

⁴ Samara State Medical University of the Ministry of Healthcare
of the Russian Federation, Samara, Russia

¹ dodonova.evg@gmail.com, ² vartaric@yandex.ru,

³ golovnin@ssau.ru, ⁴ anton.ivashenko@gmail.com

Abstract. Background. The paper presents a new timeline branching method in monitoring and modeling systems, with which it is possible to determine the necessary and sufficient number of scenes for decision-making by dividing the situation under consideration into branches with positive, negative and neutral scenarios for the development of a complex social system, which makes it possible to increase the accuracy of the forecast. *Materials and methods.* The solution is based on the theory of cross-correlation analysis of odd time series, which allows you to process chains of events to determine linear and possible causal relationships. The timeline branching method consists of the following steps: branching, approximation and adaptive sampling of timelines, or a vector method for supply and demand. *Results.* The proposed method has been tested in order to analyze the dynamics of accumulated statistics on the key parameters "Number of new infections" and "Availability of medical care for patients with COVID". *Conclusions.* The proposed method makes it possible to identify critical scenes, which are important elements in planning, since can then be used to improve decision support process.

Keywords: digital transformation, social system, monitoring, risk management, time series, decision support

For citation: Dodonova E.A., Dubinina I.N., Golovnin O.K., Ivashchenko A.V. Time scale branching method for the situation development simulation in the digital healthcare monitoring system. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):111–127. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-7

Введение

В настоящее время на уровнях государственного и регионального управления уделяется особое внимание процессам цифровой трансформации, в основе которых находятся постоянный автоматизированный сбор и обработка множества параметров, характеризующих текущее состояние и развитие организационных систем. Применение передовых технологий и статистических методов для поиска скрытых закономерностей, таких как алгоритмы семантического и статистического анализа, позволяет выделить основные необходимые

и достаточные показатели, которые становятся основой в процессе поддержки принятия решений.

Обычно для решения этой задачи используются автоматизированные системы мониторинга и моделирования. Мониторинг позволяет лицу, принимающему решения, наблюдать за наиболее значимыми показателями в режиме реального времени. В свою очередь, моделирование дает возможность произвести прогноз динамики показателей с учетом всех возможных воздействий, как положительных, так и отрицательных. Однако при этом возникают трудности во время работы с непредсказуемыми цепочками событий, которые требуют от алгоритмов адаптации к изменяющимся темпам развития обстановки.

Для решения этой проблемы в данной статье предлагается новый метод ветвления временной шкалы для моделирования развития ситуации с использованием цифровой системы мониторинга данных в здравоохранении. Предлагаемый метод позволяет по результатам моделирования повысить адекватность и точность прогноза, а также определить необходимое и достаточное количество рассматриваемых ситуаций.

Современное состояние проблемы

Цифровая трансформация затрагивает практически все процессы управления в организационных системах [1, 2]. Использование цифровой системы мониторинга и прогноза позволяет эффективно собирать данные о текущей социально-экономической ситуации, оценивать их, выявлять основные тенденции и закономерности развития, находить проблемные зоны и в кратчайшие сроки их исправлять, а также своевременно прогнозировать их возникновение. Важной составляющей мониторинга и моделирования являются статистические методы и приемы [3, 4], наиболее полно и точно отражающие специфику развития во времени показателей, характеризующих исследуемую ситуацию.

В основе статистических методов лежит анализ больших данных [5, 6], с которым тесно связана теория статистического анализа. Она способствует нахождению естественных закономерностей между предыдущим и последующим состояниями системы, которая находится под влиянием внешних, постоянно меняющихся условий. Данное исследование основано на анализе неэквидистантных временных рядов [7] и продолжается по мере изучения статистических и семантических тенденций развития цифровых социальных и экономических систем [8–10].

Информация, полученная в ходе мониторинга, может быть обработана путем сравнительного анализа, который включает в себя сравнение полученных результатов с установленными целями и задачами, анализ динамики развития обстановки и прогноз. Может применяться ситуационный анализ, с помощью которого оцениваются сильные и слабые стороны рассматриваемой ситуации, а также угрозы и возможности. Важной чертой становится непрерывность, позволяющая определять коррективы развития с учетом быстро меняющихся факторов внешней и внутренней среды [11].

Одним из основных существующих инструментов анализа данных является Business Intelligence (BI) [12, 13]. Процесс обработки данных в BI-системах состоит из этапов извлечения исходных данных из различных источников, их преобразования и загрузки в систему для последующего анализа. В последние годы развитие получила разработка собственных BI-платформ, основанных на

технологии Data Discovery, позволяющей обнаруживать полезную информацию в общем массиве данных.

На данный момент существует множество BI-платформ и инструментов визуализации, которые позволяют эффективно работать с данными, тем самым помогая принимать управленческие решения [14]. К их преимуществам можно отнести интерактивную визуализацию, возможность одновременно использовать данные различных типов, геопространственную аналитику, комбинирование данных из различных баз данных и других источников, мониторинг в реальном времени непрерывных потоков данных и удобную совместную работу пользователей.

Учитывая последние тенденции развития государства в сфере цифровизации, следует выделить так называемую стратегию умного общества (Smart Society) [15, 16]. Это социально-экономическая и культурная стратегия развития общества, основанная на использовании цифровых технологий во всех сферах жизни для улучшения жизни людей, например в здравоохранении [17, 18]. Одним из ее элементов является наличие ситуационных центров и оперативных штабов, которые анализируют текущую ситуацию с помощью различных инструментов мониторинга. Таким образом, современные ситуационные центры формируются как комплекс информационных и программно-аппаратных средств, предназначенных для работы руководителей и экспертных групп с целью быстрой оценки проблемной ситуации, оперативного построения и моделирования различных сценариев развития ситуации на основе специальных методов обработки больших объемов информации.

Основой существующих систем социального мониторинга являются агрегирование и анализ параметров, описывающих рассматриваемую обстановку и ее изменения во времени. Например, социальная обстановка описывается количеством населения, экономическими показателями, уровнями образования и медицинского обслуживания, туристической привлекательностью и т.д. Обстановка описывает сложные отношения, которые являются результатом взаимодействия различных участников. В нее входят субъекты, отношения между ними и их состояния, складывающиеся в результате различных действий субъектов.

Материалы и методы

Рассмотрим параметры обстановки – набор показателей, которые численно характеризуют текущую ситуацию, а также тенденции ее изменения во времени. Выделим такие понятия, как «событие» – отметка в пространстве-времени, характеризующая существенные изменения объектов и субъектов обстановки, а также влияющие на них факторы, и «сцена» – представление текущей или прогнозируемой обстановки, подразумевающее распределение объектов и предметов на карте с использованием географической информационной системы (ГИС). Рассмотрим также «сценарий» – последовательность сцен, содержащих происходящие или прогнозируемые события.

На основе этих основных определений была разработана формально-логическая модель, которая формализует обстановки в комплексной социальной системе.

Структурные элементы обстановки представим в виде x_i , где $i = 1 \dots N_x$ – уникальный индекс структурного элемента в составе сетевой модели. Развитие обстановки описывается вариантом сценария V_b . Ведем для него обозначение

ситуации в виде $S_{j,b}$, для которой принадлежность структурных элементов x_i будет обозначаться логическим отношением

$$s_{i,j,b} = s_{i,j,b}(x_i, S_{j,b}) = \{0,1\}. \quad (1)$$

Функция $s_{i,j,b}$ принимает значение «1», если структурный элемент x_i включен в текущее описание обстановки, и значение «0», если нет.

Дополнительно вводим геоинформационный слой $L_{x,j,b}$ для отображения на цифровой карте, который содержит исчерпывающее описание определенного аспекта обстановки для лица d_m , принимающего решения, в рамках рассматриваемой обстановки $S_{j,b}$. Распределение структурных элементов по слоям осуществляется в соответствии с необходимостью путем задания отношений

$$\begin{aligned} L_{n,m,i,j,b} &= g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}, \\ L_{n,m,i,j,b} &= g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для структурных элементов ситуации в рамках индивидуальной обстановки задаются логические связи в виде бинарных отношений типа A_p

$$A_{p,j,b}(x_{i1}, x_{i2}) = a_{p,j,b}(x_{i1}, x_{i2}, A_p, S_{j,b}) = \{0,1\}. \quad (3)$$

Для описания каждой ситуации задаются значения параметров обстановки K_q

$$k_{q,j,b} = k_{q,j,b}(K_q, S_{j,b}) \in \mathfrak{R} \quad L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \quad (4)$$

Предлагается описать важные факторы, определяющие изменение ситуации и переход между ситуациями в виде событий E_r изменения структурных элементов:

$$\begin{aligned} e_{r,i,j,b} &= e_{r,i,j,b}(E_r, x_i, D_{r,i,j,b}, t_{r,i,j,b}) = \{0,1\}, \\ L_{n,m,i,j,b} &= g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $t_{r,i,j,b}$ – время наступления события.

$H_{r,i,j,b}$ – семантический дескриптор, характеризующий событие как набор ключевых слов (тегов) с весами:

$$H_{r,i,j,b} = \{(\tau_{r,i,j,b,y}, w_{r,i,j,b,y})\}, \quad L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}, \quad (6)$$

где $\tau_{r,i,j,b,y}$ – тег (ключевое слово), а $w_{r,i,j,b,y}$ – вес тега в облаке.

Таким образом, ситуация представляется следующим образом:

$$\Omega = (\{s_{i,j,b}\}, \{a_{p,j,b}\}, \{k_{q,j,b}\}, \{e_{r,i,j,b}\}). \quad L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \quad (7)$$

Мониторинг и моделирование ситуации осуществляется путем последовательного расширения графа (7) за счет вычисления дополнительных параметров $\{k_{q,j,b}\}$, выявления новых отношений $\{a_{p,j,b}\}$ за счет влияющих факторов и построения новых вариантов развития обстановки $\{s_{i,j,b}\}$ в результате анализа данных о событиях $\{e_{r,i,j,b}\}$.

Предложенная ситуационная модель была использована для решения задачи автоматизированного моделирования вариантов темпов развития

организационных систем и легла в основу метода ветвления временной шкалы. Метод предназначен для визуализации прогнозируемых сценариев в автоматизированных системах поддержки принятия решений. Возможные генерируемые варианты включают положительные, отрицательные и нейтральные сценарии.

Основная идея метода заключается в разбиении текущей ситуации на несколько вариантов, которые позволяют сгенерировать отдельные сценарии ее развития во времени. Метод позволяет оценить близость нейтрального ожидаемого сценария к его положительным и отрицательным вариантам, что приводит к генерации рекомендаций по сбору дополнительных входных данных или по приложению дополнительных усилий для снижения рисков или уклонения от негативных эффектов.

Метод ветвления временной шкалы состоит из двух этапов:

1. Генерация ветвей.
2. Дискретизация временных рядов.

Согласно введенной модели каждый вариант сценария V_b характеризуется рядом параметров $k_{q,j,b}$ и содержит последовательность сцен $s_{i,j,b}$, вызванных очередью событий $e_{r,i,j,b}$.

Введенный метод ветвления временной шкалы содержит определение момента времени t^0 , когда базовая ситуация разбивается на несколько текущих сценариев, описывающих альтернативные варианты развития.

Обозначим их как $V_b(t^0)^+$ для положительного сценария, $V_b(t^0)^-$ для отрицательного сценария и $V_b(t^0)$ для нейтрального сценария, что в основном соответствует ожидаемому развитию реалистичных событий.

Для поддержки принятия решений необходимо определить горизонт существования t'

$$t' : \Delta t = t' - t^0 \rightarrow \max, V_b(t')^+ \neq \text{null}; V_b(t')^- \neq \text{null}; V_b(t') \neq \text{null}.$$

$$L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \quad (8)$$

Это означает, что указанные варианты V_b ограничены логическим интервалом времени $[t', t^0]$ и содержат соответствующие сцены $s_{i,j,b}$, описывающие основные изменения ситуации.

Представим обобщенную функцию оценки, которая описывает текущую сцену и производит несколько ключевых показателей, описывающих ситуацию в целом:

$$f(V_b(t)) = F_b(\{s_{i,j,b}\}). L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \quad (9)$$

С помощью этой функции можно определить близость сценариев. Для обеспечения эффективной поддержки принятия решений должна быть сформирована последовательность сцен $s_{i,j,b}$, обеспечивающая максимальное отклонение положительного и отрицательного сценариев:

$$|f(V_b(t')^+) - f(V_b(t')^-)| \rightarrow \max. L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \quad (10)$$

Последующий анализ степени близости положительного и отрицательного сценариев к нейтральному помогает понять достаточность данных и усилий, имеющихся в момент времени t^0 :

$$\Delta f^+ = |(V_k(t')^+) - f(V_k(t'))|; \Delta f^- = |(V_k(t')^-) - f(V_k(t'))|.$$

$$L_{n,m,i,j,b} = g_{n,m,i,j,b}(x_i, d_m, L_{n,j,b}) = \{0,1\}. \quad (11)$$

В случае $\Delta f^+ < \Delta f^-$ данных не хватает и необходимо собрать дополнительную информацию, чтобы снизить излишний оптимизм.

В противном случае следует запланировать дополнительные мероприятия, чтобы снизить риски (рис. 1–3).

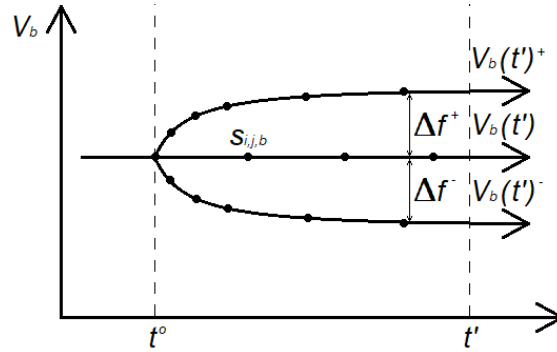


Рис. 1. Ветвление, при котором $\Delta f^+ = \Delta f^-$

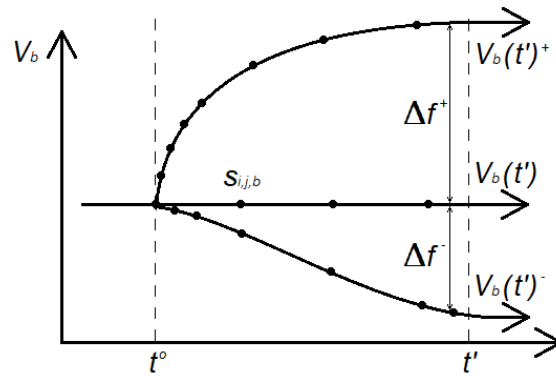


Рис. 2. Ветвление, при котором $\Delta f^+ > \Delta f^-$

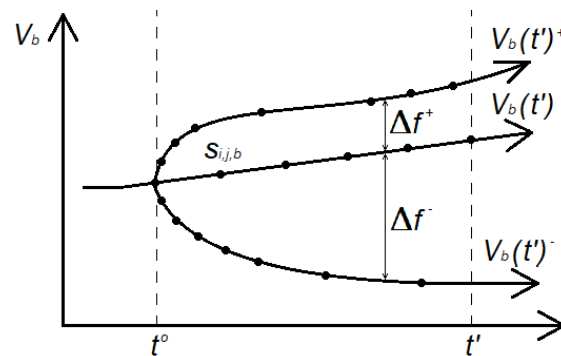


Рис. 3. Ветвление, при котором $\Delta f^+ < \Delta f^-$

Таким образом, ряд возможных сценариев развития ситуаций образуют ориентированный граф, содержащий сцены $s_{ij,b}$ в виде вершин, связанных сценариями.

Генерация ветвей может быть произведена перестройкой этого графа одним из двух способов:

1. Взять за основу $V_b(t^0)$, затем сгенерировать $V_b(t')$, развить $V_b(t')^+$ и $V_b(t')^-$ и, наконец, восстановить соответствующие $V_b(t^0)^+$ и $V_b(t^0)^-$.
2. Взять за основу $V_b(t^0)$, затем сгенерировать $V_b(t^0)^+$ и $V_b(t^0)^-$ и разработать соответствующие $V_b(t')$, $V_b(t')^+$ и $V_b(t')^-$.

Следующим шагом метода ветвления временной шкалы является адаптивная дискретизация временных рядов. Для повышения достоверности и адекватности разработанных оценок предлагается ввести промежуточные состояния каждой ветви временной шкалы в виде сцен $s_{ij,b}$. Общий подход основан на единой выборке, когда каждая ветвь разбивается на постоянные временные интервалы. Этот подход легко реализовать, но он требует создания нескольких сцен, что отнимает много времени и требует сложных вычислений.

В рамках этого метода предлагается реализовать адаптивную дискретизацию на основе аппроксимации функций $f(V_b(t))$, $f(V_b(t)^+)$ и $f(V_b(t)^-)$. В качестве аппроксимирующих выражений используются статистически подтвержденные закономерности зависимостей ключевых показателей ситуации от времени. Для оценки ошибки аппроксимации используется стандартное отклонение. Самые оптимистичные и пессимистичные модели используются для разработки соответствующих отраслей с учетом конечных состояний в t' .

Адаптивная дискретизация каждой ветви позволяет генерировать необходимое и достаточное количество сцен, требуемых для описания динамических изменений, исключая избыточные данные. В основе принципов адаптивной дискретизации лежит слежение за текущей погрешностью изменения параметра.

Использование адаптивной дискретизации актуально лишь для непрерывных функций. Анализировать скачкообразные функции целесообразно с помощью векторного метода спроса и предложения (рис. 4).

Чем больше разница между спросом и предложением, тем скорее нужно принимать меры и чаще отслеживать значения показателя. Если разница минимальна или ее нет, то и количество отслеживаемых сцен будет минимально. Предлагаемый метод рекомендуется как компонент для управления и визуализации данных в аналитических системах и специализированном программном обеспечении для ситуационного управления и поддержки принятия решений.

Результаты

Предлагаемый метод реализован в цифровой платформе интегрального мониторинга (ЦПИМ) [19, 20], включающей информационные виджеты, описывающие динамику текущих показателей развития социально-экономической обстановки в привязке к геоинформационной системе. Цель программного решения – предоставить лицам, принимающим решения, весь спектр ключевых показателей регионального развития в краткой и удобной форме (рис. 5).

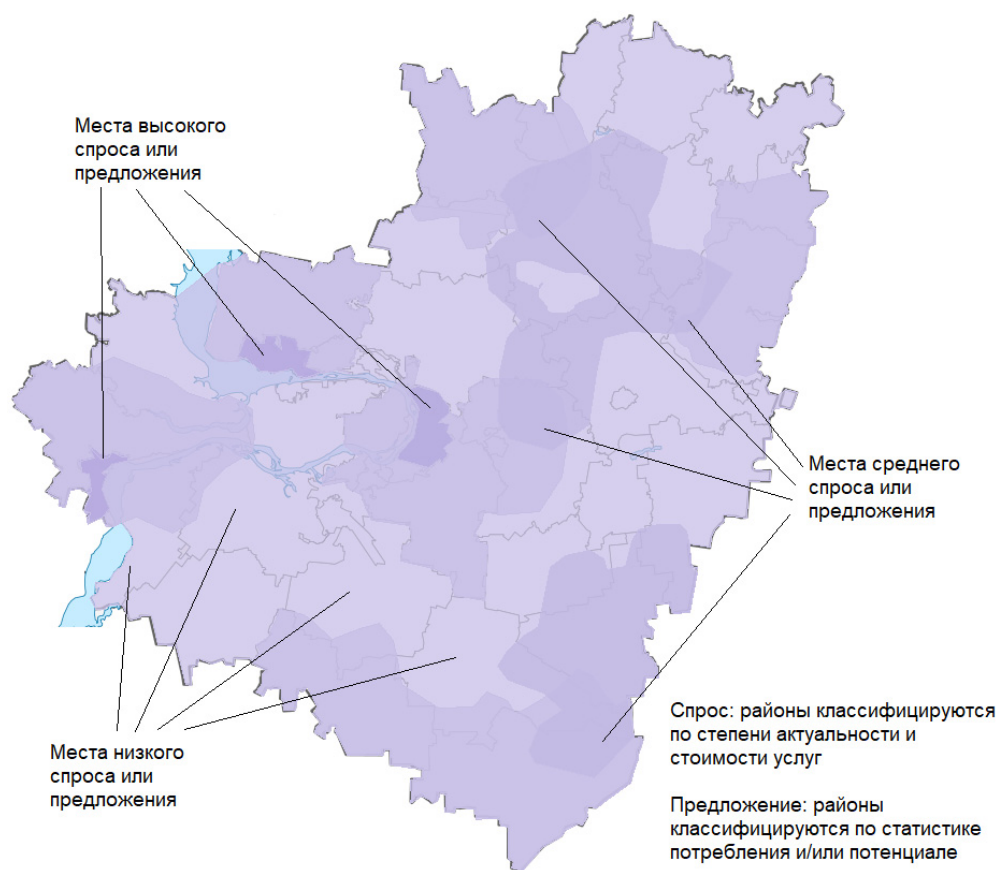


Рис. 4. Рельеф спроса или предложения на карте



Рис. 5. Мониторинг показателей развития

Карта в реализованной системе организована в виде многослойной модели, что позволяет накладывать друг на друга несколько слоев, содержащих разные объекты. Тем самым появляется возможность комбинировать и

отображать больше информации, необходимой пользователю, что значительно упрощает пространственный анализ объектов.

Чтобы провести более точный анализ, необходимо учитывать фактор времени. С его помощью будет удобнее выделить причинно-следственную связь, чтобы понять, как изменилась социально-экономическая ситуация в регионе, что позволит оценить риск ее ухудшения. В связи с этим используется ветвление временной шкалы для сравнения и моделирования развития ситуации с учетом нескольких вариантов. Временной анализ отображаемых на карте событий и значений социально-экономических показателей позволяет рассчитывать косвенные показатели, такие как напряженность ситуации, колебания информационного фона и т.п.

Предложенный метод был реализован и протестирован для сферы здравоохранения в 2021–2022 гг. с целью анализа динамики накопленной статистики по ключевому параметру роста заболеваемости, который является критичным в настоящее время. Исходные данные включают понедельную статистику заболеваемости коронавирусом в Самарской области, взятую из открытых источников сети Интернет (рис. 6).

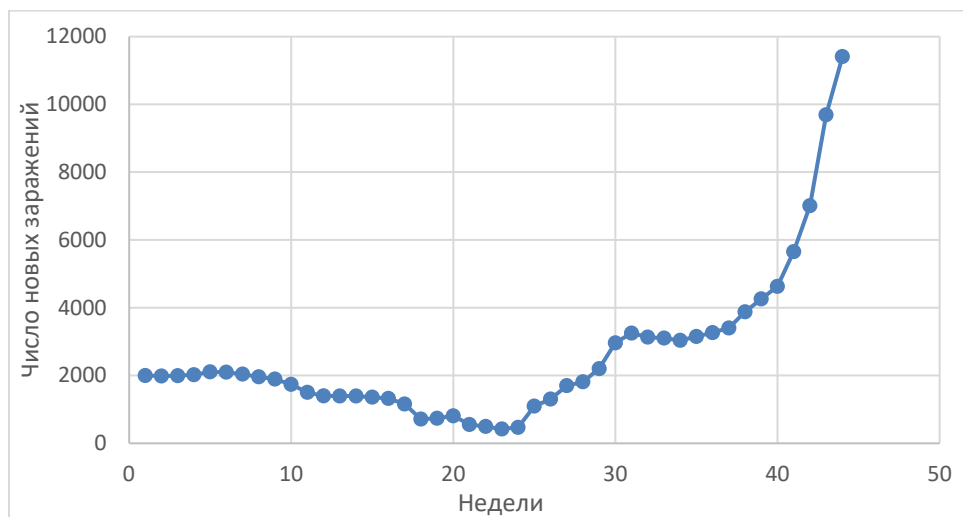


Рис. 6. Накопленная статистика по ключевому параметру роста заболеваемости

Этот показатель соответствует параметру «Количество новых заражений», который отслеживается Министерством здравоохранения региона в разрезе районов Самарской области. При этом возможно возникновение очага заболеваемости, который может привести к резкому увеличению значений рассматриваемого показателя. Минздрав должен оперативно отреагировать на этот скачок, чтобы стабилизировать ситуацию.

Фрагменты, описывающие основные закономерности критических зависимостей, были аппроксимированы линейными сплайнами, как показано на рис. 7. Полученные в результате функции аппроксимации позволили разработать прогнозы для положительных, отрицательных и ожидаемых ветвей временной шкалы (рис. 8).

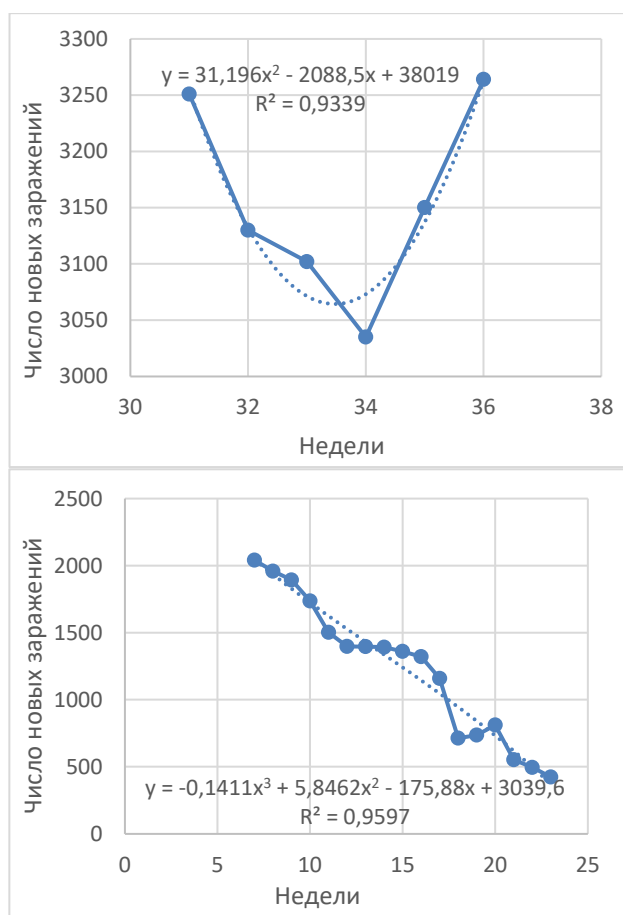


Рис. 7. Примеры аппроксимированных фрагментов

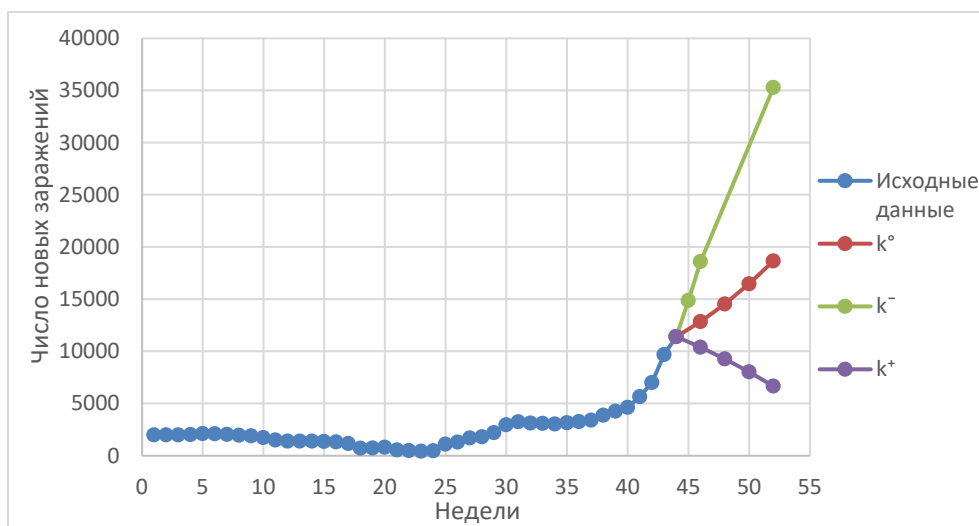


Рис. 8. Сгенерированные ветви временной шкалы с адаптивной дискретизацией

Как видно из полученного графика, пессимистическая оценка требует заблаговременного сбора и оценки дополнительной информации. Реалистичный сценарий оказывается ближе к пессимистичному, что показывает ухудшение ситуации, но подтверждает, что сбор исходных данных достаточен. Этот результат реализован в виде виджета в системе мониторинга для поддержки принятия решений и рекомендован администрации области.

Второй рассматриваемый пример касается показателя «Доступность медицинского обеспечения для больных COVID». На карте отображены COVID-госпитали Самарской области, что соответствует рельефу предложения медицинских услуг (рис. 9).

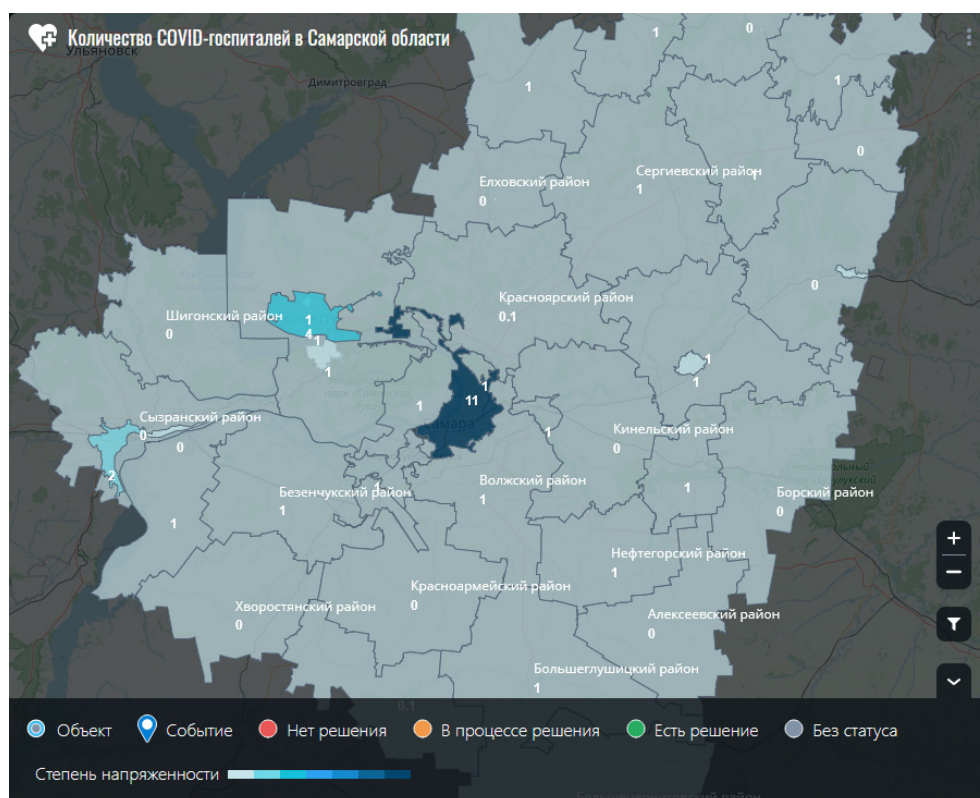


Рис. 9. Рельеф предложения медицинских услуг

На карте сформирован слой, представляющий рельеф спроса (рис. 10). Он зависит от численности проживающих в рассматриваемых районах жителей, вместимости медицинских организаций и количества заболевших.

Путем наложения рельефа спроса на рельеф предложения выявлены районы, где необходимо увеличить вместимость медицинских организаций или их количество (рис. 11). Если спрос намного выше предложения, то нужно предпринять действия по улучшению предложения и довольно часто следить за их исполнением. В свою очередь, районы, где спрос соответствует предложению, не представляют большого интереса, а значит, отслеживать ситуацию в них можно редко.

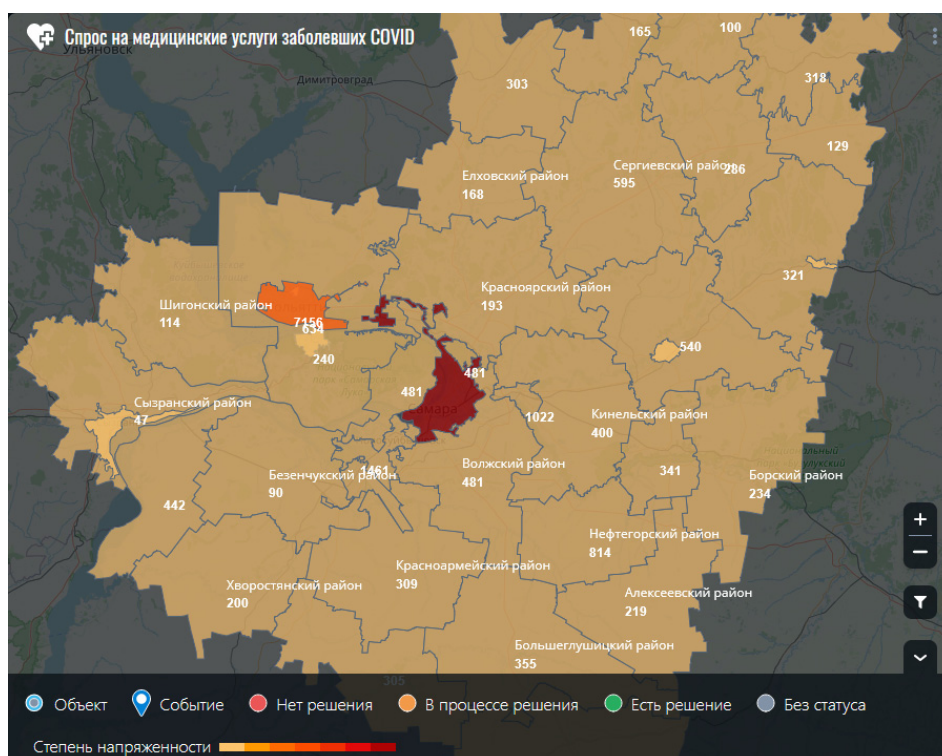


Рис. 10. Рельеф спроса медицинских услуг

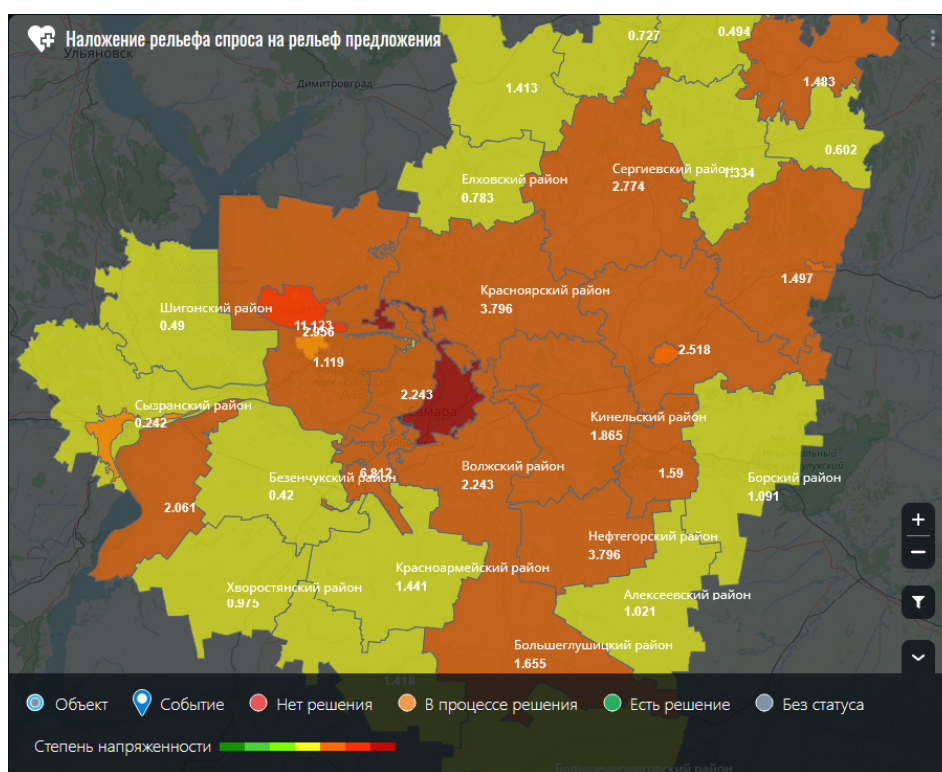


Рис. 11. Наложение рельефов

Заключение

Предлагаемый метод ветвления временной шкалы с учетом многокритериального описания оценки социально-экономической обстановки позволяет наиболее удобно для восприятия пользователей исследовать возникающие проблемы. В свою очередь, использование ситуационной модели в сочетании со статистическим анализом неэквидистантных временных рядов помогает в прогнозировании ситуаций. Адаптивная аппроксимация позволяет идентифицировать критические сцены, которые являются важными элементами в планировании, так как затем могут быть использованы для улучшения процесса поддержки принятия решений.

Список литературы

1. Козлов С. В. Перспективы внедрения интеллектуальных цифровых технологий в процессы управления // Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Брянск, 30 ноября 2018 г.). Брянск : Брян. гос. инженерно-технол. ун-т., 2018. С. 236–240.
2. Digital Russia. New Reality. Digital McKinsey. 2017. 133 p. URL: <https://www.mckinsey.com/ru/our-work/mckinsey-digital> (дата обращения: 17.05.2023).
3. Filz M. A., Herrmann C., Thiede S. Simulation-based data analysis to support the planning of flexible manufacturing // 18 ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik Conference. 2019. P. 413–422.
4. Grami A. Analysis and processing of random processes. 2019. doi: 10.1002/9781119300847.ch12
5. Михайлин И. В. Мониторинг как многофункциональный метод информационно-аналитической работы // Вестник Московского государственного лингвистического университета. Общественные науки. 2017. № 1. С. 144–155.
6. Ma S., Huai J. Approximate computation for big data analytics // ACM SIGWEB Newsletter. 2021. P. 18.
7. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С. А. Прохорова. Самара : СНЦ РАН, 2007. 582 с.
8. Ivaschenko A., Lednev A., Diyazitdinova A., Sitnikov P. Agent-based outsourcing solution for agency service management // Lecture Notes in Networks and Systems. 2018. Vol. 16. P. 204–215.
9. Ivaschenko A., Stolbova A., Golovnin O. Data market implementation to match retail customer buying versus social media activity // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1228. P. 363–372.
10. Sitnikov P., Dodonova E., Dokov E. [et al.]. Digital transformation of public service delivery processes in a smart city // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 296. P. 332–343.
11. Рябенко Д. О. Ситуационный анализ в государственном и муниципальном управлении региона // Эффективное государственное и муниципальное управление как фактор социально-экономического развития территорий : сб. 2021. С. 148–150.
12. Харанен Л. М., Гусев А. В. Обзор BI-платформ для применения в проектах информатизации здравоохранения // Менеджер здравоохранения. 2015. № 10. С. 41–51.
13. Седойкина А. А. Аналитическая обработка данных. Обзор BI-платформ // Контентус. 2019. № S11. С. 96–102.
14. Srivastava G., Muneeswari S., Venkataraman R. [et al.]. A review of the state of the art in business intelligence software // Enterprise Information Systems. 2021. P. 128.
15. Головин В. Т., Уразко С. Е., Голева А. К. Тенденции развития системы ситуационных центров // Кластерные инициативы в формировании прогрессивной структуры национальной экономики и финансов. 2021. С. 53–57.

16. Hitachi-UTokyo Laboratory (H-UTokyo Lab.): Society 5.0. A People-centric Super-smart Society. 2020. 177 p.
17. Milenković M. J., Vukmirović A., Milenković D. Big data analytics in the health sector: challenges and potentials // *Management Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*. 2019. P. 23–31.
18. Синцева М. М., Кузьмин А. В., Дятлов Н. Е. Система моделирования процесса обслуживания пациентов в медицинских учреждениях для поддержки принятия управленческих решений // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2022. № 1. С. 94–104. doi: 10.21685/2227-8486-2022-1-10
19. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022668401. Цифровая платформа интегрального мониторинга / Головнин О. К., Додонова Е. А., Дубинина И. Н., Иващенко А. В., Кривошеев А. В., Крупин Д. Н., Ситников П. В., Сурнин О. Л. ; заявитель и патентообладатель ООО «Сириус-Самара» ; зарег. 06.10.2022.
20. Сурнин О. Л., Ситников П. В., Иващенко А. В. [и др.]. Применение цифровой платформы интегрального мониторинга как средства бизнес-аналитики социально-экономического развития региона // *Информационные технологии в управлении (ИТУ-2022) : сб. материалов конф. (5–6 октября 2022 г.)*. СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 158–161.

References

1. Kozlov S.V. Prospects for the introduction of intelligent digital technologies into management processes. *Tsifrovoy region: opyt, kompetentsii, proekty: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Bryansk, 30 noyabrya 2018 g.) = Digital region: experience, competencies, projects : collection of articles of the International scientific and practical conference (Bryansk, November 30, 2018)*. Bryansk: Bryansk gos. inzhenernotekhnol. un-t., 2018:236–240. (In Russ.)
2. *Digital Russia. New Reality. Digital McKinsey*. 2017:133. Available at: <https://www.mckinsey.com/ru/our-work/mckinsey-digital> (accessed 17.05.2023).
3. Filz M.A., Herrmann C., Thiede S. Simulation-based data analysis to support the planning of flexible manufacturing. *18 ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik Conference*. 2019:413–422.
4. Grami A. *Analysis and processing of random processes*. 2019. doi: 10.1002/9781119300847.ch12
5. Mikhaylin I.V. Monitoring as a multifunctional method of information and analytical work. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo lingvisticheskogo universiteta. Obshchestvennye nauki = Bulletin of the Moscow State Linguistic University. Social sciences*. 2017;(1):144–155. (In Russ.)
6. Ma S., Huai J. Approximate computation for big data analytics. *ACM SIGWEB Newsletter*. 2021:18.
7. Prokhorov S.A. (ed.). *Prikladnoy analiz sluchaynykh protsessov = Applied analysis of random processes*. Samara: SNTs RAN, 2007:582. (In Russ.)
8. Ivaschenko A., Lednev A., Diyazitdinova A., Sitnikov P. Agent-based outsourcing solution for agency service management. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2018;16:204–215.
9. Ivaschenko A., Stolbova A., Golovnin O. Data market implementation to match retail customer buying versus social media activity. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1228:363–372.
10. Sitnikov P., Dodonova E., Dokov E. et al. Digital transformation of public service delivery processes in a smart city. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;296:332–343.

11. Ryabenko D.O. Situational analysis in state and municipal management of the region. *Effektivnoe gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie kak faktor sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territoriy: sb. = Effective state and municipal management as a factor of socio-economic development of territories : collection.* 2021:148–150. (In Russ.)
12. Kharanen L.M., Gusev A.V. Review of BI-platforms for use in healthcare informatization projects. *Menedzher zdravookhraneniya = Health care manager.* 2015;(10):41–51. (In Russ.)
13. Sedoykina A.A. Analytical data processing. Review of BI-platforms. *Kontentus.* 2019;(S11):96–102. (In Russ.)
14. Srivastava G., Muneeswari S., Venkataraman R. et al. A review of the state of the art in business intelligence software. *Enterprise Information Systems.* 2021:128.
15. Golovin V.T., Urazko S.E., Goleva A.K. Trends in the development of a system of situational centers. *Klasternye initsiativy v formirovanii progressivnoy struktury natsional'noy ekonomiki i finansov = Cluster initiatives in the formation of a progressive structure of the national economy and finance.* 2021:53–57. (In Russ.)
16. Hitachi-UTokyo Laboratory (H-UTokyo Lab.): *Society 5.0. A People-centric Super-smart Society.* 2020:177.
17. Milenković M.J., Vukmirović A., Milenković D. Big data analytics in the health sector: challenges and potentials. *Management Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies.* 2019:23–31.
18. Sintseva M.M., Kuz'min A.V., Dyatlov N.E. System of modeling the process of patient care in medical institutions to support managerial decision-making. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2022;(1):94–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2022-1-10
19. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM № 2022668401. Tsifrovaya platforma integral'nogo monitoringa = Certificate of registration of the computer program No. 2022668401. Digital integrated monitoring platform.* Golovnin O.K., Dodonova E.A., Dubinina I.N., Ivashchenko A.V., Krivosheev A.V., Krupin D.N., Sitnikov P.V., Surnin O.L.; applicant and patent holder of "Sirius-Samara" LLC; reg. 06.10.2022. (In Russ.)
20. Surnin O.L., Sitnikov P.V., Ivashchenko A.V. et al. Application of the digital integrated monitoring platform as a means of business analytics of socio-economic development of the region. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2022): sb. materialov konf. (5–6 oktyabrya 2022 g.) = Information technologies in management (ITU-2022) : collection of materials conf. (October 5–6, 2022).* Saint Petersburg: SPbGETU «LETI», 2022:158–161. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгения Александровна Додонова

аналитик,
ООО «Открытый код»
(Россия, г. Самара,
ул. Ульяновская, 52/55)
E-mail: dodonova.evg@gmail.com

Evgeniya A. Dodonova

Analyst,
Open Code LLC
(52/55 Ulyanovskaya street,
Samara, Russia)

Ирина Николаевна Дубинина

руководитель проектов,
ООО «Открытый код»
(Россия, г. Самара,
ул. Ульяновская, 52/55)
E-mail: vartaric@yandex.ru

Irina N. Dubinina

Project manager,
Open Code LLC
(52/55 Ulyanovskaya street,
Samara, Russia)

Олег Константинович Головнин

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
систем и технологий,
Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара,
ул. Московское шоссе, 34)
E-mail: golovnin@bk.ru

Oleg K. Golovnin

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of information
systems and technologies,
Samara National Research University
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Антон Владимирович Иващенко

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

Anton V. Ivashchenko

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

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

Поступила в редакцию/Received 30.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 18.05.2023

Принята к публикации/Accepted 07.06.2023

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РАБОТЫ СЕРДЦА ПО СЕГМЕНТАРНЫМ КРИВЫМ В ТРЕХ НАПРАВЛЕНИЯХ

Ю. Г. Смирнов¹, Е. А. Гундарев²

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

¹ smirnovyug@mail.ru, ² psu.gun@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показатели работы левого желудочка (ЛЖ) с учетом сокращения волокон по трем направлениям позволяют моделировать и прогнозировать сократительную способность миокарда без хирургического вмешательства. Изучение работы сердца с учетом биомеханики позволит в клинической практике выявлять на ранних стадиях всевозможные отклонения и своевременно корректировать лечение сердечно-сосудистых заболеваний. Целью настоящего исследования является разработка численного метода для расчета работы сегментов ЛЖ по трем направлениям одновременно. *Материалы и методы.* Исследование пациентов проводилось с помощью УЗИ аппарата «Vivid™ E95» в режиме 4D-визуализации. Для расчета работы как отдельного сегмента, так и всего ЛЖ в целом реализован численный метод. *Результаты.* Разработан численный метод расчета предложенных показателей работы ЛЖ. Проведен сравнительный анализ полученных индексов работы с уже существующими показателями. *Выводы.* Предложенные показатели позволяют оценить эффективность сократительной функции миокарда. Разработанный численный метод расчета индекса работы учитывает все виды деформации: растяжение-сжатие, сдвиг, изгиб, кручение. Сегментарные взаимодействия открывают уникальные возможности для детального изучения сердца.

Ключевые слова: 3DSTE, миокардиальная работа, сегментарная продольная деформация, сегментарная циркулярная деформация, сегментарная радиальная деформация, функция миокарда

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «Биомеханика сердца у здоровых и больных острым инфарктом миокарда, исследуемая методом 3D-спекл-эхокардиографии» (№ 19-315-90031\19).

Для цитирования: Смирнов Ю. Г., Гундарев Е. А. Численный метод расчета работы сердца по сегментарным кривым в трех направлениях // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 128–143. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-8

NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING THE WORK OF THE HEART ALONG SEGMENTAL CURVES IN THREE DIRECTIONS

Yu.G. Smirnov¹, E.A. Gundarev²

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

¹ smirnovyug@mail.ru, ² psu.gun@mail.ru

Abstract. *Background.* The index of the work of the left ventricle, taking into account fiber contraction in three directions, allows modeling and predicting myocardial contractility without surgical intervention. The study of the work of the heart, taking into account biomechanics, will allow in clinical practice to identify all kinds of deviations at an early stage and timely correct the treatment of cardiovascular diseases. The aim of this study is to develop a numerical method for calculating the work of LV segments in three directions simultaneously. *Materials and methods.* The study of patients was carried out using the ultrasound machine "VividTM E95" in the 4D imaging mode. To calculate the work of both the specific segment and the entire LV, a numerical method is implemented. *Results.* A numerical method for calculating the proposed indicators of LV performance has been developed. A comparative analysis of the obtained work indices with existing indicators was carried out. *Conclusion.* The proposed indicators make it possible to evaluate the effectiveness of the contractile function of the myocardium. The developed numerical method for calculating the work index takes into account all types of deformation: tension-compression, shear, bending, torsion. Segmental interactions offer unique opportunities for detailed study of the heart.

Keywords: 3DSTE, myocardial work, segmental longitudinal strain, segmental circumferential strain, segmental radial strain, myocardial function

Financing: the work was carried out with the financial support of the RFBR in the framework of the scientific project "Biomechanics of the heart in healthy and patients with acute myocardial infarction, investigated by 3D speckle echocardiography" (№ 19-315-90031\19).

For citation: Smirnov Yu.G., Gundarev E.A. Numerical method for calculating the work of the heart along segmental curves in three directions. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(2):128–143. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-8

Введение

Одной из актуальных проблем на сегодняшний день является изучение биомеханики сердца. Это, безусловно, важнейшее направление, которое является ключом для познания всей сердечно-сосудистой системы в целом как в норме, так и при различных патологиях.

На сегодняшний день для оценки контрактильной функции левого желудочка (ЛЖ) в клинической практике одним из важнейших показателей является фракция выброса (ФВ). Подобные глобальные индексы малоинформативны и не позволяют локализовывать возможные отклонения в работе сердца [1, 2]. Метод трехмерной визуализации 3D-спекл-трекинг (3DSTE) открывает новые возможности в изучении сегментарных взаимодействий и позволяет количественно оценить насосную функцию сердца [3]. Сегментация сокращений волокон миокарда с последующим получением величин деформации является одним из важнейших этапов моделирования работы сердца.

Деформационные характеристики остаются все еще малоизученными. Показатели работы, основанные на сегментарных данных, могут более тонко отражать систолическую функцию. Это достигается благодаря возможности оценивать работу ЛЖ с учетом взаимодействий не только всех миокардиальных волокон, но и каждого сегмента в отдельности.

Деформация миокарда

Датчики УЗИ аппарата фиксируют движения соседних точек волокон миокарда. Если векторы скорости точек имеют разные направления, то происходит изменение формы – деформация миокарда. Функция деформации $\varepsilon(t)$ – это

зависимость степени изменения ЛЖ в систолу по отношению к его конечно-диастолическому размеру от момента времени t [4].

Изменение размера сегмента определяется путем интегрирования скорости деформации следующим образом:

$$\Delta d = \int_{t_0}^t \vartheta(t) dt. \quad (1)$$

Таким образом, смещение и скорость смещения характеризуют изменение формы и являются мерами деформации.

В каждый момент времени t изменение формы ЛЖ происходит сразу в трех направлениях (рис. 1). В эхокардиографии показатели деформации распределяются по плоскостям: продольной (от верхушки до основания), радиальной (по радиусу к центру) и циркулярной (вдоль по периметру окружности).

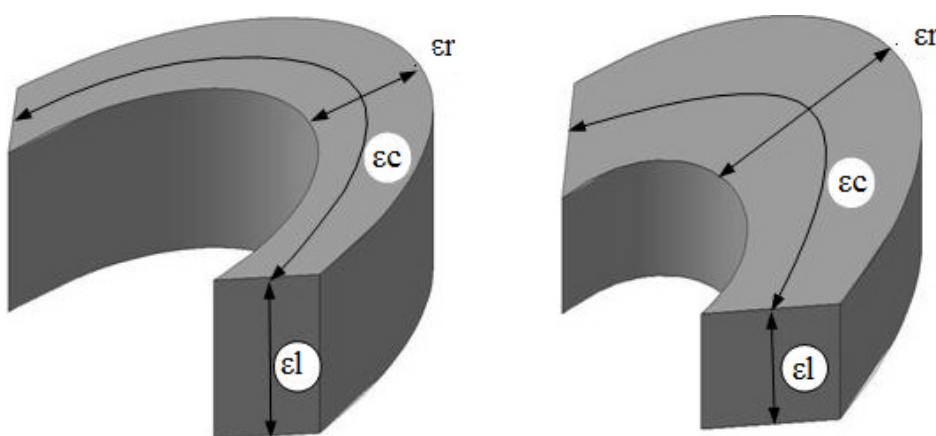


Рис. 1. Плоскости деформации левого желудочка:
слева – диастола, справа – систола

Продольная деформация ϵ_l – это сокращение сердечной мышцы, направленное от основания до верхушки сердца. Определим продольную деформацию миокарда следующим образом:

$$\epsilon_l = \frac{L_s - L_d}{L_d}, \quad (2)$$

где L_s – длина сегмента в систолу; L_d – длина сегмента в диастолу. Во время систолы $\epsilon_l < 0$, так как сегменты сжимаются от основания к верхушке.

Циркулярная деформация (англ. *circumferential strain*) характеризует укорочение окружности ЛЖ. Пусть длина окружности задается следующим образом:

$$C = \pi D, \quad (3)$$

где D – диаметр окружности.

Тогда определим циркулярную деформацию как

$$\epsilon_c = \frac{C_s - C_d}{C_d}, \quad (4)$$

где C_s – длина окружности сегмента в систолу; C_d – длина окружности в диастолу.

Во время деформации сегмента в продольном и циркулярном направлениях для сохранения объема ЛЖ стенка желудочка должна утолщаться в поперечном направлении. Такая деформация называется радиальной (англ. *radial strain*) и представляет собой деформацию, вектор которой направлен к центру полости миокарда. Радиальных волокон не существует, и данный тип деформации зависит от продольных и циркулярных деформаций. Но радиальная деформация является сегментарным показателем и определяется следующим образом:

$$\epsilon_r = \frac{(R_s - R_d)}{R_d}, \quad (5)$$

где R_s – ширина стенки ЛЖ в систолу; R_d – ширина стенки в диастолу.

При $\epsilon > 0$ сегмент растягивается и, соответственно, при $\epsilon < 0$ сжимается. Если $\epsilon = 0$, то сегмент не меняет свой размер.

Для расчета работы необходима скорость деформации на единицу времени. Определим скорость сокращения сегмента следующим образом:

$$\vartheta_\epsilon = \frac{d\epsilon}{dt}. \quad (6)$$

Во время систолы сердечные мышцы укорачиваются с помощью продольных волокон и скручиваются (деформация циркулярных мышц) вдоль своей оси. Одновременно с этим за счет работы поперечных волокон стенка ЛЖ утолщается (радиальная деформация).

Представленная упрощенная модель сегментарных сокращений позволяет математически смоделировать работу миокарда и является важнейшим этапом расчета показателей работы сегментов ЛЖ. Как уже отмечалось ранее, изменение формы ЛЖ происходит одновременно в трех плоскостях и, таким образом, представляет собой сложный процесс. При моделировании работы ЛЖ необходимо принимать во внимание трехмерную природу сокращения миокарда. Такой подход позволит объяснить многие закономерности деформации сегментов ЛЖ.

Расчет работы ЛЖ

Предложенные индексы работы основываются на идеях К. Russell [5], но отражают не конкретную патологию, а характеризует работу ЛЖ в целом, в том числе включая в себя уже существующие показатели.

Полезная работа W_{cons} (англ. *constructive work*) определяется сложением значений затраченных работ на сжатие отдельных сегментов в систолу во время укорочения волокон миокарда (положительная работа) и на удлинение волокон во время изоволюметрического расслабления. Аналогичным образом

определяется потраченная работа W_{wast} (англ. *wasted work*) – сумма работ при удлинении волокон во время систолы и их укорочение во время изоволюметрического расслабления.

Подходы К. Russell включены в пакет программ УЗИ аппарата «Vivid™ E95», но все показатели работы рассчитываются только в 2D-режиме. Для сравнения новых индексов работы с уже существующими показателями в 3D-режиме необходимо самостоятельно провести все расчеты.

Рассмотрим деформацию как перемещение Δd точек мышц сердца. Давление ЛЖ P_{LV} – важная составляющая в работе сердца. В сердечном цикле P_{LV} представляет собой силу, которую мышцам ЛЖ необходимо преодолеть для чередования сердечных циклов. В связи с тем, что мышцы должны преодолеть давление, будем рассматривать силу, с которой давление воздействует на волокна, с отрицательным знаком.

Механическая работа определяется следующей формулой:

$$A = F \Delta d \cos \gamma. \quad (7)$$

Пусть F – это давление P_{LV} с отрицательным знаком, Δd – это деформация. Предположим, что $\cos \gamma = 1$, так как сила давления равномерно распределена по поверхности ЛЖ и мы можем считать, что вектор силы действует под прямым углом. Тогда работа сегмента равна

$$A^e = -1 \cdot P_{LV} \epsilon. \quad (8)$$

Количество работы сегмента ЛЖ, которая совершается за единицу времени t , выражается следующим образом:

$$N^e = \frac{A^e}{t}. \quad (9)$$

Пусть $A^e(t)$ – это функция накопленной работы сегмента в момент времени t . Проинтегрируем N^e на интервале $[0, t]$ и получим работу сегмента

$$A^e(t) = \int_0^t N^e(t') dt'. \quad (10)$$

В дальнейших расчетах рассматриваем сегментарную работу только на интервале времени от момента закрытия митрального клапана до его открытия.

Пусть W_{pos} – накопленная сумма всех работ, выполненных в ходе укорочения сегмента, W_{neg} – накопленная сумма всех работ, выполненных при удлинении сегмента. Таким образом, W_{pos} – общая положительная работа, а W_{neg} – общая потраченная работа (рис. 2).

Тогда определим полную работу i -го сегмента как сумму положительной и отрицательной работы $W_{total}^i = W_{pos}^i + W_{neg}^i$. Значения позитивной и негативной работы взяты по величине на временном промежутке сердечного цикла от t_{MVC} до t_{MVO} .

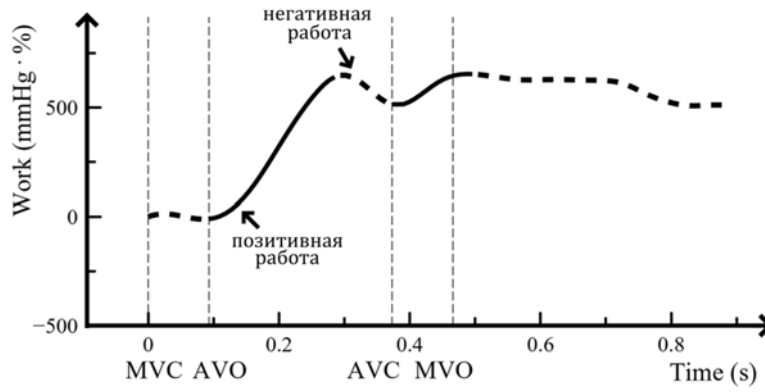


Рис. 2. Позитивная и негативная работа

Тогда показатель потерянной работы i -го сегмента определяется как сумма негативной работы в систолу и позитивной работы в диастолу

$$W_{wast}^i = W(t_s^i)_{pos}^i + W(t_d^i)_{neg}^i, \quad (11)$$

где t_s^i – момент времени в систолу, t_d^i – момент времени в диастолу.

Полезная работа i -го сегмента выражается следующим образом:

$$W_{cons}^i = \frac{W_{total}^i - W_{wast}^i}{W_{total}^i}. \quad (12)$$

Для расчета полезной работы левого желудочка предложена формула

$$W_{cons} = \sum_{i=1}^{17 \cdot 3} W_{cons}^i. \quad (13)$$

Рассмотрим работу i -го сегмента в фазу выброса W_{ej}^i (англ. *Ejection work*) (рис. 3). В этот момент времени выполняется одна из важнейших работ сердца – выброс крови. Определим работу выброса следующим образом:

$$W_{ej}^i = A^i(AVC) - A^i(AVO). \quad (14)$$

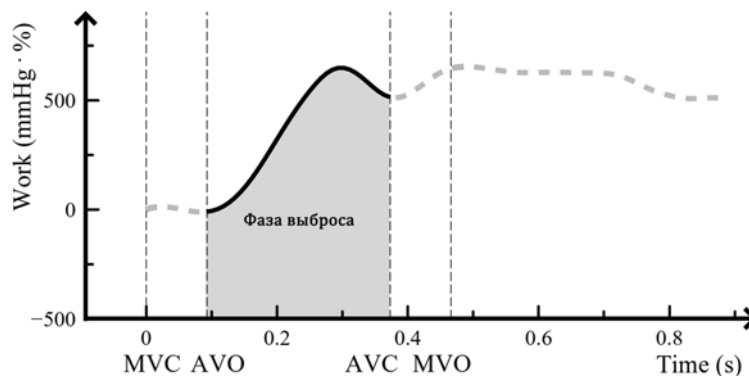


Рис. 3. Работа ЛЖ на интервале времени от AVO до AVC (в фазу выброса)

Теперь мы можем найти отношение работы, выполненной во время фазы выброса, к работе за сердечный цикл для каждого отдельного сегмента. Получим индекс работы i -го сегмента в фазу выброса I_{ej}^i следующим образом:

$$I_{ej}^i = \frac{W_{ej}^i}{W_{total}^i}. \quad (15)$$

Для расчета индекса работы всех сегментов ЛЖ предложена формула

$$I_{ej} = \frac{W_{ej}}{W_{total}}, \quad (16)$$

где W_{ej} – работа левого желудочка в фазу выброса, определяемая формулой

$$W_{ej} = \sum_{i=1}^{17 \cdot 3} W_{ej}^i, \quad (17)$$

W_{total} – работа ЛЖ на временном промежутке от MVC до MVO задается формулой

$$W_{total} = \sum_{i=1}^{17 \cdot 3} W_{total}^i. \quad (18)$$

Численный метод расчета работы ЛЖ

Скорость деформации i -го сегмента в момент времени t :

$$v^i(t) = -\frac{d\varepsilon^i}{dt}(t). \quad (19)$$

Количество работы i -го сегмента ЛЖ определяется формулой

$$P^i(t) = v^i(t) P_{LV}^i(t) = -\frac{d\varepsilon^i}{dt}(t) P_{LV}^i(t). \quad (20)$$

Работа сегмента рассчитывается интегрированием функции мощности на интервале $[0, t]$.

Работа i -го сегмента:

$$A^i(t) = \int_0^t P^i(t') dt' = -\int_0^t \frac{d\varepsilon^i}{dt}(t') \Delta P_{LV}^i(t') dt', \quad (21)$$

где t' – переменная интегрирования.

При вычислении работы на ЭВМ для аппроксимирования площади под кривой мгновенной мощности воспользуемся правилом трапеций [6]. Пусть $p = p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ – это заданные ординаты, а $t = t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ – соответствующие значения абсциссы функции $P^i(t)$. Тогда элементарная формула площади трапеций дает следующее выражение:

$$\bar{A} = \frac{1}{2}(p_0 + p_1)(t_1 - t_0) + \dots + \frac{1}{2}(p_{n-1} + p_n)(t_n - t_{n-1}). \quad (22)$$

Площадь j -й трапеции находится следующим образом:

$$\bar{A}_j = \frac{1}{2}(p_{j-1} + p_j)(t_j - t_{j-1}). \quad (23)$$

Накопленная работа i -го сегмента определяется формулой

$$A^i(t_n) = \sum_{j=0}^n \bar{A}_j. \quad (24)$$

Погрешность метода:

$$R(P) = \max_{[a,b]} |P''(t)| \frac{\Delta t^3}{12}, \quad (25)$$

где $\Delta t = \max_i (t_i - t_{i-1})$.

Расчет работы на основе сегментарных данных, полученных с помощью 3DSTE

Для получения давления ЛЖ необходимо синхронизировать временные сетки сердечного цикла, полученные в 2D и в 3D-режимах.

Пусть $V(t)$ – функция объема ЛЖ. Определим момент времени закрытия аортального клапана в данных, полученных в 3D-режиме следующим образом:

$$t_{avc} = \min_{t_{mvc} \leq t \leq t_{mvo}} V(t), \quad (26)$$

где t_{mvc} – момент времени закрытия митрального клапана и t_{mvo} – момент времени открытия митрального клапана.

Пусть временная сетка в данных, полученных в 3D-режиме, задана на промежутке $t_{3d} \in [a, b]$, аналогично в 2D – на $t_{2d} \in [c, d]$. Найдем систолический коэффициент (отношение интервала времени в систолу к интервалу времени в диастолу) в данных 2D следующим образом:

$$K_{2d} = \frac{AVC_{2d} - c}{d - c}. \quad (27)$$

Найдем аналогично систолический коэффициент в данных 3D:

$$K_{3d} = \frac{AVC_{3d} - a}{b - a}. \quad (28)$$

Отношение временных шкал в 2D и в 3D-режимах:

$$K_t = \frac{d - c}{b - a}. \quad (29)$$

С помощью полученных значений K_{2d} , K_{3d} , K_t мы можем синхронизировать временную сетку в данных 3D с данными 2D по формуле

$$t_{3d} = \frac{(t_{2d} - a) K_{2d} K_t}{K_{3d}} + c. \quad (30)$$

По формуле (30) мы можем синхронизировать временную сетку давления ЛЖ $P_{LV}(t)$ из 2DSTE с сегментарными данными из 3DSTE.

По полученной временной сетке восстановим функцию давления с помощью кубического сплайна. Пусть функция $g_3(t, P_{LV})$ – интерполяционный кубический сплайн для функции давления $P_{LV}(t)$ на $[a, b]$. Тогда

$$\begin{aligned} g_3(t, s) &\in C^2[a, b], \\ g_3(t_i, s) &= s(t_i), \\ g_3''(a) &= 0, \\ g_3''(b) &= 0, \end{aligned} \quad (31)$$

где $t_i \in [t_{i-1}, t_i]$ и $i = \overline{1, N}$.

Представим функцию давления $P_{LV}(t)$ на любом i -м отрезке через кубический сплайн $g_3(t, P_{LV})$:

$$g(t_i) = a_i + b_i(t - t_{i-1}) + c_i(t - t_{i-1})^2 + d_i(t - t_{i-1})^3, \quad (32)$$

где $t_{i-1} \leq t \leq t_i$.

Положим $h_i = t_i - t_{i-1}$. Коэффициенты на i -м отрезке представим в виде системы линейных уравнений:

$$c_1 = 0, \quad (33)$$

$$g(t_{i-1}) = s(t_{i-1}) = a_i, \quad 1 \leq i \leq N, \quad (34)$$

$$b_{i+1} = b_i + 2c_i h_i + 3h_i^2, \quad 1 \leq i \leq N-1. \quad (35)$$

$$c_{i+1} = c_i + 3d_i h_i, \quad 1 \leq i \leq N-1, \quad (36)$$

$$c_N + 3d_N h_N = 0. \quad (37)$$

Из уравнений (36) и (37) следует, что

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{c_{i+1} - c_i}{3h_i}, \quad 1 \leq i \leq N-1, \\ d_N &= -\frac{c_N}{3h_N}. \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, исключая a_i , мы можем представить систему линейных уравнений для коэффициентов c_i следующим образом:

$$c_1 = 0, \quad (39)$$

$$F_{i-1} = \frac{3(s_i - s_{i-1})}{h_i} - \frac{3(s_{i-1} - s_{i-2})}{h_{i-1}}, \quad 2 \leq i \leq N, \quad (40)$$

$$h_{i-1}c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_i c_{i+1} = F, \quad 2 \leq i \leq N, \quad (41)$$

$$c_{N+1} = 0. \quad (42)$$

Разностное уравнение решим методом прогонки, представив его в виде

$$Ax = F, \quad (43)$$

где x соответствует вектору $\{c_i\}$, матрица A имеет следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} C_1 & B_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ A_2 & C_2 & B_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & B_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_n & C_N \end{pmatrix}. \quad (44)$$

Прогоночные коэффициенты находятся по формулам

$$\alpha_{i+1} = \frac{-B_i}{A_i \alpha_i + C_i}, \quad (45)$$

$$\beta_{i+1} = \frac{F_i - A_i \beta_i}{A_i \alpha_i + C_i}. \quad (46)$$

Получим решение системы

$$x_N = \frac{F_N - A_N \beta_N}{C_N + A_N \alpha_N}. \quad (47)$$

На рис. 4 представлены шаги расчета работы по сегментарным данным 3DSTE. Работа представлена как функция, зависящая от времени на протяжении всего сердечного цикла. Сначала интерполируется функция давления, далее по формуле (19) получим скорость сегментарного укорочения (скорость деформации). Далее по формуле (20) определим количество выполненной работы и по формуле (21) найдем работу сегмента.

Найдем моменты времени закрытия митрального клапана t_{MVC} , открытия аортального клапана t_{AVO} , открытия митрального клапана t_{MVO} по формуле (30).

Показатели эффективности работы ЛЖ

На рис. 5–7 представлены графические результаты сравнения показателей работы у здорового пациента. Полезная работа W_{cons}^i сопоставляется с предложенным показателем работы в фазу выброса I_{ej} . Для удобства сравнения добавлен индекс полной миокардиальной работы. Все индексы работы представлены в процентах. Данные деформации получены в 3D-режиме.

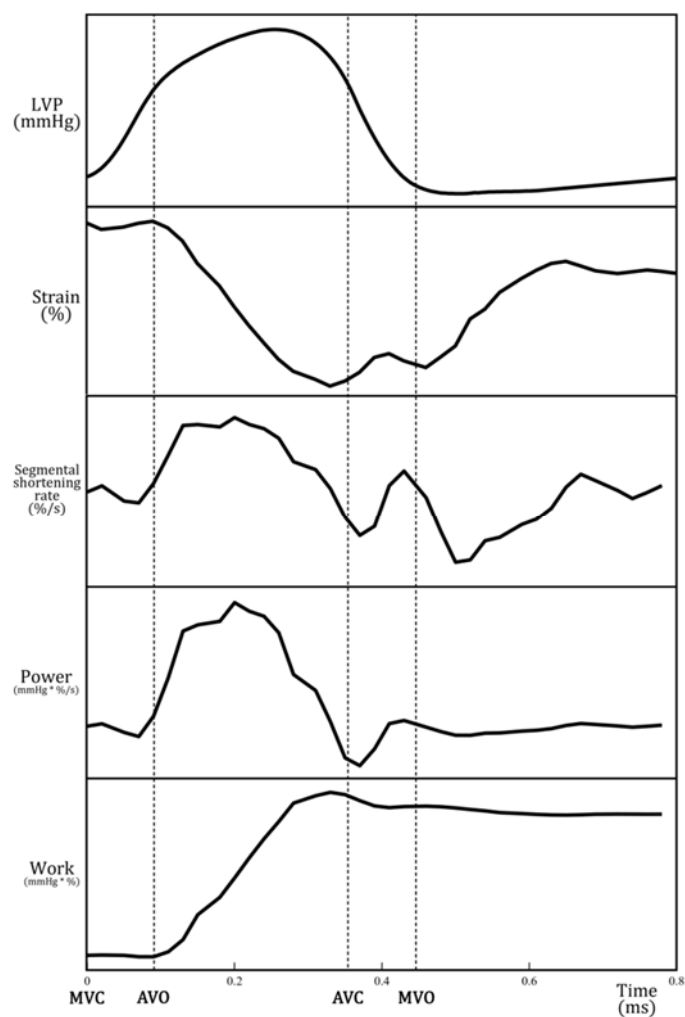


Рис. 4. Этапы вычисления работы сегмента по сегментарным данным 3DSTE.
LVP (Left Ventricle Pressure) – давление в ЛЖ

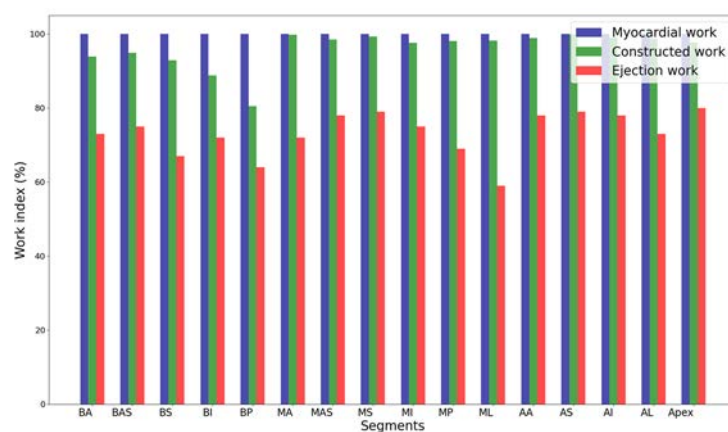


Рис. 5. Миокардиальная работа, W_{ej}^i и существующий показатель работы W_{cons}^i в отдельных сегментах ЛЖ продольной деформации у здорового пациента

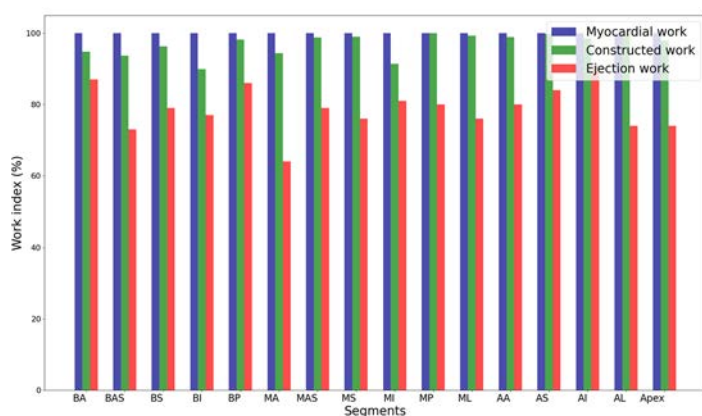


Рис. 6. Миокардиальная работа, W_{ej}^i и существующий показатель работы W_{cons}^i в отдельных сегментах ЛЖ циркулярной деформации у здорового пациента

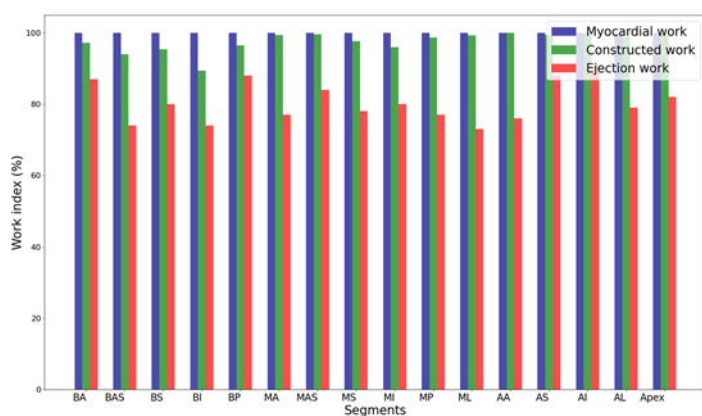


Рис. 7. Миокардиальная работа, W_{ej}^i и существующий показатель работы W_{cons}^i в отдельных сегментах ЛЖ радиальной деформации у здорового пациента

На рис. 8–10 представлены графические результаты сравнения тех же показателей работы, но у больного пациента.

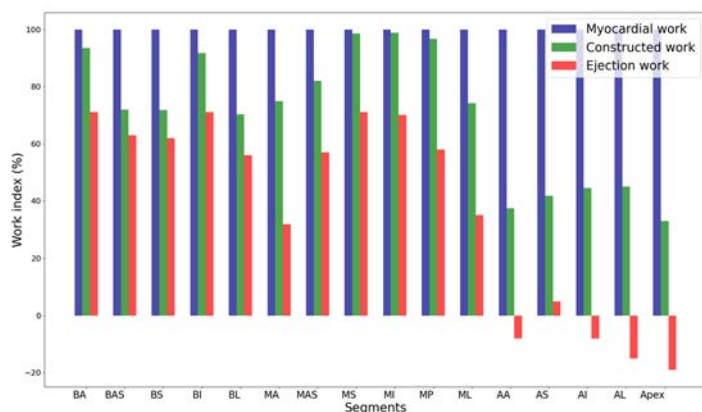


Рис. 8. Миокардиальная работа, W_{ej}^i и существующий показатель работы W_{cons}^i в отдельных сегментах ЛЖ продольной деформации у больного пациента

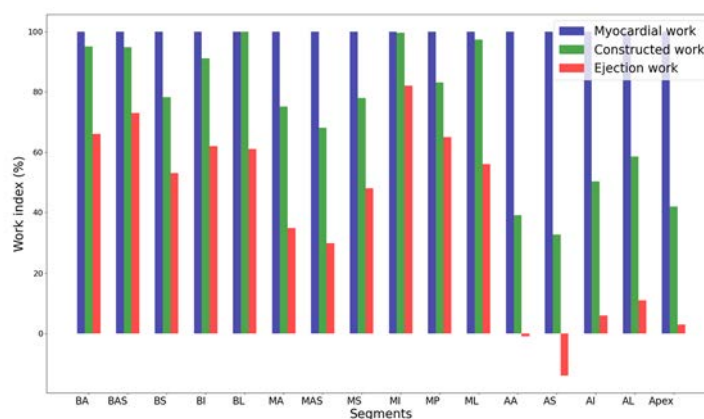


Рис. 9. Миокардиальная работа, W_{ej}^i и существующий показатель работы W_{cons}^i в отдельных сегментах ЛЖ циркулярной деформации у больного пациента

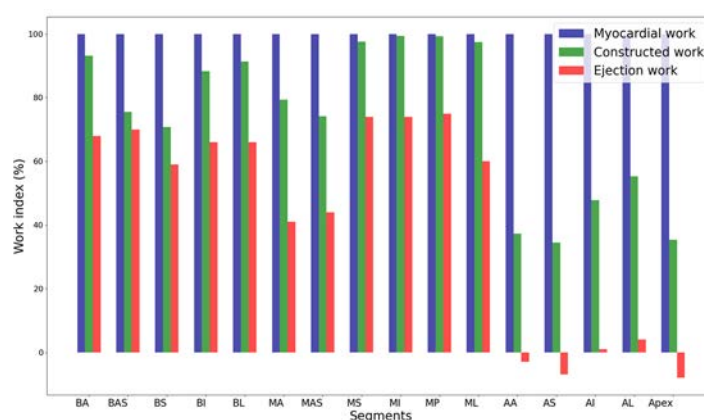


Рис. 10. Миокардиальная работа, W_{ej}^i и существующий показатель работы W_{cons}^i в отдельных сегментах ЛЖ радиальной деформации у больного пациента

Из рис. 8–10 видно, что для здорового человека показатели W_{ej}^i и W_{cons}^i близки по значениям, а для больного STEMI сильно различаются, особенно в пораженных сегментах (см. рис. 5, сегменты AI, AL, Apex).

Обсуждение результатов

Отрицательные значения W_{ej}^i и I_{ej}^i сегментов свидетельствуют об удлинении волокон в этих сегментах в период, когда неповрежденные сегменты укорачиваются. Тем самым предложенный показатель включает в себя уже существующий W_{cons}^i . При этом можно заметить, что W_{ej}^i значительно чувствителен к отклонениям работы сегментов, так как в целом характеризует эффективность работы мышц миокарда.

Выводы

Рассматриваемые показатели характеризуют сократительную способность сегментов ЛЖ. Основным вкладом в данный показатель является работа

в фазу выброса крови, что позволяет оценить эффективность волокон. Реализован численный метод нахождения работы сегментов ЛЖ. Скорость деформации находится путем численного дифференцирования сегментарных кривых двухсторонней разностью. Предложен метод синхронизации данных, полученных в 2D и 3D-режимах. Интегрирование мощности для нахождения работы проводится методом трапеций.

Список литературы

1. Олейников В. Э., Смирнов Ю. Г., Галимская В. А. [и др.]. Новые характеристики продольной сократимости, определенные методом Speckle Tracking // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2019. № 1.
2. Галимская В. А., Голубева А. В., Куприянова С. Н. Оценка деформационных характеристик миокарда технологией двухмерного стрейна у больных с острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2015. № 2. С. 93–102.
3. Muraru D., Niero A., Rodriguez-Zanella H. [et al.]. Three-dimensional speckle-tracking echocardiography: benefits and limitations of integrating myocardial mechanics with three-dimensional imaging // Cardiovascular Diagnosis and Therapy. 2018. № 8. P. 101–117.
4. Олейников В. Э., Смирнов Ю. Г., Голубева А. В. [и др.]. Оценка сократительной способности миокарда на основе технологий 2D и 3D-Speckle Tracking // Медицинская техника. 2020. № 321. С. 21–25.
5. Russell K., Eriksen M., Aaberge L. [et al.]. Assessment of wasted myocardial work: a novel method to quantify energy loss due to uncoordinated left ventricular contractions // American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology. 2013. Vol. 305. P. 996–1003.
6. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2003. 640 с.
7. Buckberg G., Hoffman J. I., Mahajan A. [et al.]. Cardiac mechanics revisited: the relationship of cardiac architecture to ventricular function // Circulation. 2008. № 118. P. 2571–2587. doi: 10.21685/2072-3032-2019-1-3
8. Russell K., Eriksen M., Aaberge L. [et al.]. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure-strain loop area: a non-invasive index of myocardial work // European Heart Journal. 2012. Vol. 33, iss. 6. P. 724–733.
9. Yodwut C., Weinert L., Klas B. [et al.]. Effects of frame rate on three-dimensional speckle-tracking-based measurements of myocardial deformation // Journal of the American Society of Echocardiography. 2012. № 25. P. 978–985.
10. Boe E., Skulstad H., Smiseth O. A. Myocardial work by echocardiography: a novel method ready for clinical testing // European Heart Journal. Cardiovascular Imaging. 2019. Vol. 20. P. 18–20.
11. Boe E., Smiseth O. A., Storsten P. [et al.]. Left ventricular end-systolic volume is a more sensitive marker of acute response to cardiac resynchronization therapy than contractility indices: insights from an experimental study // Europace. 2019. Vol. 21. P. 347–355.
12. Galimskaya V., Golubeva A., Kupriyanova S., Oleinikov V. Myocardial deformation in STEMI patients with different types of left ventricle remodeling // European Journal of Heart Failure. 2018. Vol. 20 (suppl. S1). P. 42.
13. Oleynikov V. E., Galimskaya V. A., Kupriyanova S. N., Burko N. V. Use of the Speckle tracking method for determining global parameters of heart contractility in healthy individuals // MethodsX. 2018. Vol. 5. P. 125–135.

References

1. Oleynikov V.E., Smirnov Yu.G., Galimskaya V.A. et al. New characteristics of longitudinal contractility determined by the Speckle Tracking method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = Izvestiya of higher educational institutions. Volga region. Medical sciences*. 2019;(1):27–39. (In Russ.)
2. Galimskaya V.A., Golubeva A.V., Kupriyanova S.N. Evaluation of myocardial deformation characteristics by two-dimensional strain technology in patients with acute myocardial infarction with ST segment elevation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Medical sciences*. 2015;(2):93–102. (In Russ.)
3. Muraru D., Niero A., Rodriguez-Zanella H. et al. Three-dimensional speckle-tracking echocardiography: benefits and limitations of integrating myocardial mechanics with three-dimensional imaging. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2018;(8):101–117.
4. Oleynikov V.E., Smirnov Yu.G., Golubeva A.V. et al. Assessment of myocardial contractility based on 2D and 3D-Speckle Tracking technologies. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2020;(321):21–25. (In Russ.)
5. Russell K., Eriksen M., Aaberge L. et al. Assessment of wasted myocardial work: a novel method to quantify energy loss due to uncoordinated left ventricular contractions. *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*. 2013;305:996–1003.
6. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2003:640. (In Russ.)
7. Buckberg G., Hoffman J. I., Mahajan A. et al. Cardiac mechanics revisited: the relationship of cardiac architecture to ventricular function. *Circulation*. 2008;(118):2571–2587. doi: 10.21685/2072-3032-2019-1-3
8. Russell K., Eriksen M., Aaberge L. et al. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure-strain loop area: a non-invasive index of myocardial work. *European Heart Journal*. 2012;33(6):724–733.
9. Yodwut C., Weinert L., Klas B. et al. Effects of frame rate on three-dimensional speckle-tracking-based measurements of myocardial deformation. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2012;(25):978–985.
10. Boe E., Skulstad H., Smiseth O. A. Myocardial work by echocardiography: a novel method ready for clinical testing. *European Heart Journal. Cardiovascular Imaging*. 2019;20:18–20.
11. Boe E., Smiseth O.A., Storsten P. et al. Left ventricular end-systolic volume is a more sensitive marker of acute response to cardiac resynchronization therapy than contractility indices: insights from an experimental study. *Europace*. 2019;21:347–355.
12. Galimskaya V., Golubeva A., Kupriyanova S., Oleinikov V. Myocardial deformation in STEMI patients with different types of left ventricle remodeling. *European Journal of Heart Failure*. 2018;20(suppl. S1):42.
13. Oleynikov V.E., Galimskaya V.A., Kupriyanova S.N., Burko N.V. Use of the Speckle tracking method for determining global parameters of heart contractility in healthy individuals. *MethodsX*. 2018;5:125–135.

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Геннадьевич Смирнов

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
математики и суперкомпьютерного
моделирования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: smirnovyug@mail.ru

Yuriy G. Smirnov

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor,
head of the sub-department of mathematics
and supercomputer modelling,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Евгений Андреевич Гундарев

аспирант кафедры математики
и суперкомпьютерного моделирования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: psu.gun@mail.ru

Evgeniy A. Gundarev

Postgraduate student of the sub-department
of mathematics and supercomputer
modelling,
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 14.04.2023

Поступила после рецензирования/Revised 24.05.2023

Принята к публикации/Accepted 07.06.2023

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИМЕРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В МАКЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Д. В. Толкович

Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия
pyby@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Токпроводящие материалы, изготовленные на основе двухкомпонентных полимеров, используются в различных отраслях промышленности уже достаточно долгое время. Однако публикации, связанные с моделированием структуры таких полимеров, не часто попадают на страницы печатных изданий. В данной работе сделана попытка предложить и обосновать эквивалентную модель внутренней структуры токопроводящего материала с заданными свойствами, используемого в качестве эквивалента кожи человека для моделирования и исследования биоэлектрических сигналов. *Материалы и методы.* Для достижения цели в работе использовались методы имитационного моделирования, а именно математическое и статистическое моделирование. *Результаты.* В процессе имитационного моделирования была разработана и графически реализована модель двухкомпонентного токопроводящего полимера. Компоненты полимера представлены в виде отдельных кубиков («зерен») одного размера. Зерна объединены между собой в кубические ячейки, состоящие из 27 зерен. Соотношение общего количества проводящих и изолирующих зерен в составе материала выведено на основе соотношения изначальных объемов компонентов, а также на допущении об испарении (в процессе полимеризации материала) жидкостной составляющей токоизолирующего компонента. *Выводы.* При задании электрических характеристик для материалов как в общем случае, так и для отдельных зерен предложенная модель позволяет оценить теоретическую проводимость материала в цепях постоянного тока. В перспективе представленную модель можно и нужно адаптировать как для определения проводимости разработанного материала в цепях переменного электрического тока, так и для определения электрической проводимости других двухкомпонентных токопроводящих полимеров в цепях постоянного и переменного тока. Предложенная модель позволит создавать двухкомпонентные полимеры с заданными электрическими характеристиками, в том числе для применения в области регистрации и обработки биоэлектрических сигналов.

Ключевые слова: модель, токопроводящий полимер, электрическая проводимость, электрическое сопротивление, графит, каучук

Для цитирования: Толкович Д. В. Имитационное моделирование структуры токопроводящего полимера, используемого в макетных исследованиях биоэлектрических сигналов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 144–153. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-9

SIMULATION MODELING OF THE STRUCTURE OF A CONDUCTIVE POLYMER USED IN PROTOTYPE STUDIES OF BIOELECTRIC SIGNALS

D.V. Tolkovich

Scientific and Production Enterprise "Radar mms", St. Petersburg, Russia
pyby@inbox.ru

Abstract. *Background.* Current materials based on two-component polymers have been used in various industries for quite a long time. However, publications related to modeling the structure of such polymers do not often make it to the pages of printed publications. In the present work an attempt is made to propose and substantiate an equivalent model of the internal structure of conductive material with given properties, used as an equivalent of human skin for modeling and research of bioelectric signals. *Materials and methods.* To achieve the goal, the work used simulation methods, namely, mathematical and statistical modeling. *Results.* A model of two-component current-conducting polymer was developed and graphically realized in the process of simulation modeling. Polymer components are represented as separate cubes ("grains") of the same size. The grains are combined with each other into cubic cells consisting of 27 grains. The correlation of total number of conducting and insulating grains in the material is based on the ratio of initial volumes of components, as well as on the assumption of evaporation (in the process of polymerization) of a liquid component of the current-insulating component. *Conclusions.* When specifying the electrical characteristics for materials, both in general case and for individual grains, the proposed model allows to estimate the theoretical conductivity of material in DC circuits. In the future, the presented model can and should be adapted both to determine the conductivity of the developed material in AC circuits, and to determine the electrical conductivity of other two-component current-conducting polymers in DC and AC circuits. Also, the proposed model will make it possible to create two-component polymers with specified electrical characteristics, including applications in the field of registration and processing of bioelectric signals.

Keywords: model, conductive polymer, electrical conductivity, electrical resistance, graphite, rubber

For citation: Tolkovich D.V. Simulation modeling of the structure of a conductive polymer used in prototype studies of bioelectric signals. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):144–153. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-9

Введение

Токопроводящие материалы, изготовленные на основе двухкомпонентных полимеров, используются в различных отраслях промышленности уже достаточно долгое время. Однако публикации, связанные с моделированием структуры таких полимеров, не часто попадают на страницы печатных изданий. В данной работе сделана попытка предложить и обосновать эквивалентную модель внутренней структуры токопроводящего материала с заданными свойствами, используемого в качестве эквивалента кожи человека для моделирования и исследования биоэлектрических сигналов.

В ходе информационного поиска были найдены несколько работ, имеющих некоторое не прямое отношение к технологиям разработки и производства токопроводящих материалов на базе графита и углеродосодержащих компонентов [1–4]. Однако все упомянутые работы не затрагивают область медицинской

техники, а относятся к другим областям: нефтепереработке (обогрев трубопроводов), строительству и т.д. Несмотря на то, что работа [4] была опубликована не так давно (2018), там в явном виде сказано, что «массовое производство электропроводящих композиционных материалов сдерживается отсутствием модели электропроводности токопроводящих композитов, позволяющей интерполировать электрическую проводимость в зависимости от концентрации и агрегации частиц токопроводящей фазы, необходимой для проектирования составов материалов с заданными стабильными токопроводящими характеристиками». Во всех рассмотренных выше работах изучались свойства конкретных материалов, но отсутствовали попытки построения математических моделей для структуры и свойств исследуемых материалов.

Постановка задачи

Электрофизиологические диагностические приборы предназначены для регистрации в режиме реального времени не воспроизводимых повторно сигналов, имеющих значительную произвольную компоненту, поэтому невозможно использовать сам биологический объект в качестве источника эталонных или тестовых сигналов. Отсюда для проверки качества работы электрофизиологических приборов требуется создание устройства, способного на воспроизведение сложных динамических сигналов, с заданной степенью достоверности эквивалентных сигналам биологического объекта. Существующие аппаратные решения с использованием современных генераторов, как правило, не способны адекватно воспроизвести вышеописанные сигналы. На рис. 1 графически показаны типовые интервалы изменения основных электрофизиологических сигналов. Все сигналы имеют малую амплитуду и лежат в диапазоне низких частот. На результаты измерения этих сигналов влияют и характеристики кожи человека, на которой фиксируются регистрирующие электроды, поэтому при изучении распространения электрофизиологических сигналов необходимо опираться на электрическую проводимость кожи человека.

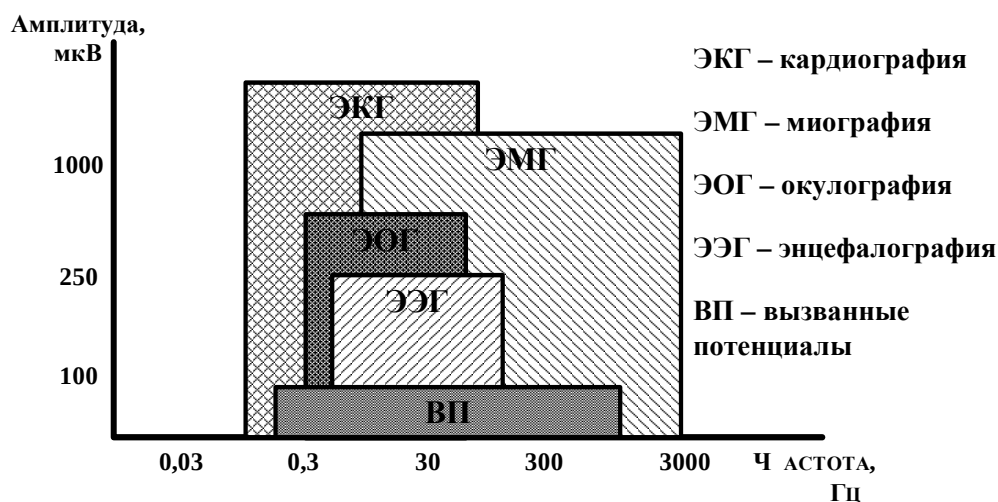


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики типовых электрофизиологических сигналов

В данной работе сделана попытка предложить и обосновать эквивалентную модель внутренней структуры токопроводящего материала с заданными свойствами, схожего по своим электрическим параметрам с кожей человека. Исследуемый токопроводящий материал предназначен для имитации кожи человека на поверхности специального манекена, выполненного в форме торса взрослого мужчины в масштабе 1 к 1. Под слоем токопроводящего материала согласно типовым схемам [5] размещены электроды для воспроизведения электрофизиологических сигналов (ЭКГ, ЭМГ, ЭЭГ и т.д., рис. 1). Манекен входит в состав комплекса для моделирования электрофизиологических исследований, куда также входят блок генерации электрофизиологических сигналов и блок управления на базе микрокомпьютера [6]. Манекен предназначен в качестве тест-объекта при проверке медицинских электрофизиологических диагностических регистрирующих приборов либо для обучения младшего медицинского персонала.

Основная часть

Электрическая проводимость живой ткани определяется не только физическими свойствами, но и сложнейшими биохимическими и биофизическими процессами [7]. В связи с этим сопротивление тела человека является переменной величиной, имеющей нелинейную зависимость от множества факторов, в том числе от параметров электрической цепи, состояния кожи, физиологических факторов и состояния окружающей среды [8]. Удельное объемное сопротивление кожи в сухом и незагрязненном состоянии составляет от $3 \cdot 10^3$ до 10^6 Ом · м при частоте тока 50 Гц [7, 8].

Активное сопротивление наружного слоя кожи R_n зависит от удельного объемного сопротивления наружного слоя кожи (эпидермиса) ρ_n значения которого находятся в пределах 10^4 – 10^5 Ом · м, от площади электрода S (м²), от толщины эпидермиса d (м) и определяется по формуле [9]

$$R_n = \rho_n \frac{d}{S}.$$

Емкостное сопротивление обусловлено тем, что в месте прикосновения электрода к телу человека образуется как бы конденсатор [7], обкладками которого являются электрод и хорошо проводящие электрический ток ткани тела человека, лежащие под наружным слоем кожи, а диэлектриком – эпидермис. Получается плоский конденсатор, емкость которого зависит от площади электрода S (м²), толщины эпидермиса d (м) и диэлектрической проницаемости эпидермиса ϵ , которая зависит от многих факторов: частоты приложенного напряжения, температуры кожи, наличия в коже влаги и др. При токе 50 Гц значения ϵ находятся в пределах от 100 до 200. Емкость конденсатора (Ф) определяется по формуле

$$C_n = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

В нормальных условиях C_n колеблется в пределах от нескольких сотен пикофард до нескольких микрофард [10].

Эквивалентную схему электрического сопротивления кожи человека можно представить как параллельное соединение сопротивления R_h и емкости C_h тела человека (рис. 2).

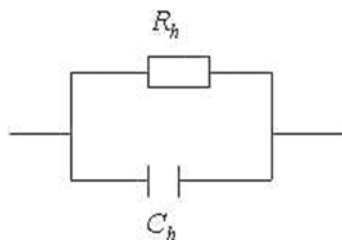


Рис. 2. Упрощенная схема замещения сопротивления кожи человека

Поскольку использовать живую ткань в качестве макета не представляется возможным, то приходится искать аналоги по набору характеристик. Кожа человека по характеристикам ближе к диэлектрикам, но все же имеет малую электрическую проводимость.

Имитирующий по электрическим параметрам кожу человека токопроводящий полимер должен соответствовать следующим требованиям:

- быть достаточно пластичным для нанесения на поверхность манекена и достаточно прочным для фиксации электродов внутри материала;
- иметь удельное электрическое сопротивление в интервале от 500 кОм до 1 МОм на см^2 (кожа человека допускает вариацию по электрическому сопротивлению, зависящую от влажности и солевого баланса);
- быть смачиваемым для обеспечения возможности использования медицинских электропроводящих гелей;
- быть устойчивым к воздействию медицинских дезинфицирующих и обеззараживающих средств;
- быть устойчивым к механическим воздействиям, способным возникнуть в процессе эксплуатации манекена;
- быть нетоксичным.

В результате анализа технологии производства токопроводящих изделий с высоким удельным сопротивлением было выяснено, что эти изделия состоят из взаимного объединения материала основы (обладающего высоким электрическим сопротивлением) и мелкодисперсного токопроводящего материала (обладающего низким электрическим сопротивлением). Обычно в качестве токопроводящего материала могут быть использованы порошковые металлы и графит. Однако в нашем случае порошковые металлы неприменимы [11], так как требуется материал с достаточно высоким удельным сопротивлением, а использование металлов не даст возможности повышать сопротивление, так как у металлов отсутствует какая-либо зависимость сопротивления, связанная с площадью соприкосновения токопроводящих частиц (при условии соприкосновения частиц). В то же время для графита такая зависимость явно выражена и описана в литературе [8].

Результаты

В результате ряда теоретических изысканий и практических экспериментов было принято решение в качестве материала основы использовать

хлоропеновый каучук 88-СА, удельное объемное электрическое сопротивление которого колеблется в пределах 10^{10} – 10^{14} Ом · м (10^{12} – 10^{16} Ом · см) [12]. В качестве токопроводящего материала было решено использовать графит марки С-1 [ТУ 113-08-48-63-90], удельное сопротивление которого составляет 0,0075 Ом [13].

Для упрощения процесса моделирования токопроводящего материала высказывается допущение, что разработанный токопроводящий материал представляет собой совокупность независимых элементов кубической формы, сопряженных между собой без каких-либо дополнительных соединительных элементов. При этом каждый из кубических элементов является единым и неделимым, однако в целях моделирования представлен как кубическая ячейка, сформированная из 27 одинаковых по форме элементов (фрагментов/зерен) с ребром, по длине равным трем диаметрам зерна графита при условии, что зерна графита рассматриваются как идеальные сферы равного размера. Тогда соотношение размеров одной ячейки и одиночного зерна (графита, вписанного в куб) можно считать равным 27:1. Сделаем допущение, что весь объем материала будет равномерно заполнен графитом и каучуком, при этом в той области пространства, где нет графита, будет каучук и наоборот; отсюда можно определить соотношение объемов для графита и каучука в одной ячейке.

Изначально создание материала определялось соотношением массовых долей графита и каучука в некотором объеме. В момент смешивания были заданы пропорции 15 массовых долей графита на 100 массовых долей каучука. Таким образом, в момент смешивания масса образца составляла 115 массовых долей. Поскольку при застывании испарялись и улетучивались только компоненты жидкого каучука, то массовая доля графита оставалась неизменной, а массовая доля каучука уменьшалась.

Если в качестве 100 массовых долей взять 1 кг каучука, то при плотности каучука равной $0,86 \text{ г/см}^3$ получаем, что объем 100 массовых долей (1 кг) клея составляет $1162,79 \text{ см}^3$. При плотности графита равной $2,23 \text{ г/см}^3$ получаем, что объем 15 массовых долей (0,15 кг) графита составляет $67,3 \text{ см}^3$.

Согласно документации [12], коэффициент высыхания состава равен 80–90 % (после высыхания останется 10–20 % твердой фракции каучука).

Для дальнейшего моделирования был выбран вариант с минимальным высыханием каучука (испарилось 80 % летучих фракций, 20 % осталось) как наименее электропроводный (имеющий наибольшее электрическое сопротивление). Варианты с большим высыханием каучука будут иметь меньшее электрическое сопротивление за счет большего количества графита на единицу объема.

Величина соотношения объема графита к общему объему, равная 0,224 (табл. 1), достаточно близка к соотношению 6 к 27 (0,222), где 6 – объемная доля графита, а 27 – общий объем материала в единице объема (кубической ячейке). Следовательно, соотношение 6 к 27 может представлять распределение графита в единичном объеме материала.

Таблица 1

Процент высыхания клея	Объем графита	Объем каучука после высыхания	Общий объем материала	Объем графита по отношению к общему объему
90 %	$67,3 \text{ см}^3$	$116,279 \text{ см}^3$	$183,579 \text{ см}^3$	0,3665
85 %	$67,3 \text{ см}^3$	$174,4185 \text{ см}^3$	$241,7185 \text{ см}^3$	0,2784
80 %	$67,3 \text{ см}^3$	$232,558 \text{ см}^3$	$299,858 \text{ см}^3$	0,2244

Согласно предлагаемой модели каждое зерно представляет собой кубический элемент, электрические характеристики которого неизменны и равнозначны в направлении между любыми двумя противоположными гранями, поэтому в качестве наиболее близкого эквивалента электрического сопротивления предлагается использовать схему, представленную на рис. 3,а. Данная схема представляет собой шесть резисторов одного номинала, соединенных в одной общей точке [14] и пространственно расположенных таким образом, что свободные контакты резисторов выходят на центры граней зерна (рис. 3,б). Такая модель позволяет считать, что в любом направлении между противоположными гранями сопротивление остается постоянным и неизменным. Эта реализация схемы позволяет воспроизводить как проводящие (графит), так и непроводящие (каучук) зерна, отличие между которыми заключается только в номинальных значениях сопротивлений. Соответственно, кубическая ячейка представлена в виде трех соединенных между собой слоев, каждый из которых состоит из девяти элементов, также соединенных между собой (рис. 3,в).

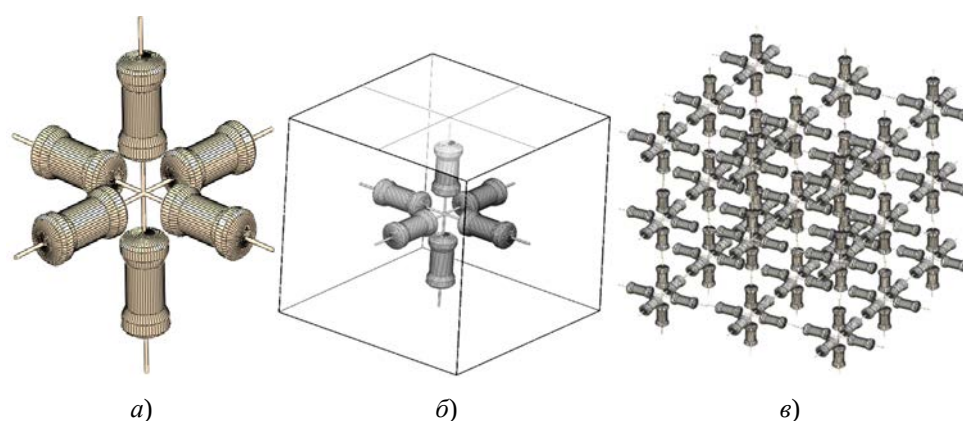


Рис. 3. Модель электрического сопротивления отдельного зерна и целой ячейки:
 а – моделирование электрического сопротивления отдельного зерна;
 б – проекция выводов соединения на грани зерна; в – демонстрация соединения отдельных зерен в кубической ячейке

Исходя из объемных долей графита и каучука, предполагается, что элемент проводимости ячейки будет представлять собой группу из трех или более зерен графита, соединенных между собой таким образом, что одно из зерен выходит на одну из граней куба, еще одно выходит на противоположную грань куба, а остальные зерна соединены между собой соседними с зернами на гранях куба. При этом электрическое сопротивление ячейки и емкость в направлении цепочки графита будут неизменны вне зависимости от расположения этой цепочки в пределах куба.

Обсуждение

Электрическое сопротивление ячейки рассматривается как значение электрического сопротивления, измеренного между противоположными гранями куба. Сопротивление одной ячейки будет зависеть от количества составляющих внутреннюю проводящую цепочку зерен. При условии, что сопротивление одного зерна графита равно условной единице (R), сопротивление зерна каучука приближается к бесконечности, сопротивление куба по постоянному

току в направлении, параллельном цепочке графита, будет принимать значение $3R$ (рис. 4,а в направлении вдоль стрелки 1 и рис. 4,б в направлении вдоль стрелки 2) или $4R$ (рис. 4,б в направлении вдоль стрелки 1), в других направлениях ∞R соответственно. Для комбинации из пяти зерен сопротивление может быть равно $3R$ в одном направлении и ∞R , $3R$, $4R$ в других направлениях.

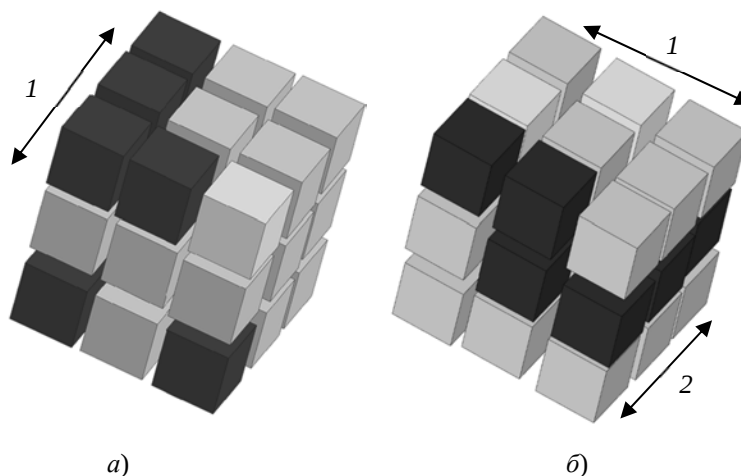


Рис. 4. Модели вариантов взаимного расположения проводящих (темное – графит) и непроводящих (светлое – каучук) зерен кубической ячейки (стрелки показывают направление электрической проводимости для отдельно взятых кубических ячеек)

Согласно предлагаемой модели проводимость между соседними ячейками возможна только при условии, что проводящая грань одной ячейки будет совмещена с проводящей гранью другой ячейки, зерно графита в одном кубе накладывается гранью на зерно графита в другом кубе. Проводимость между ребрами и вершинами зерен и кубов согласно предлагаемой модели невозможна. Зерна, соприкасающиеся с основной цепочкой, но не влияющие на проводимость в основном направлении, учитываются при оценке проводимости соседних элементов. Соседние кубы могут быть смещены относительно друг друга на одно или два зерна в любом направлении. Проводимость в выбранном направлении учитывается только для тех кубов, у которых существует проводимость в данном направлении (рис. 5).

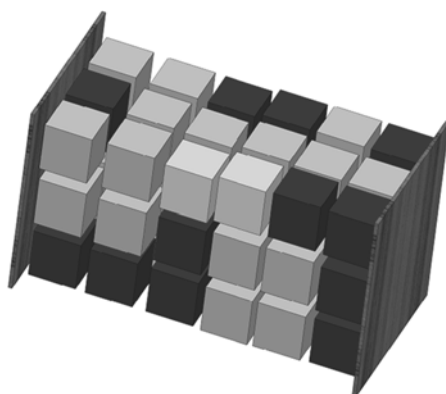


Рис. 5. Демонстрация варианта соединения двух кубических ячеек. Плоскости по краям имитируют внешние электроды

Несмотря на то, что в двух показанных на рис. 5 совмещенных ячейках имеются фрагменты проводящих цепочек, эти цепочки не образуют непрерывной цепи между электродами, следовательно, согласно предлагаемой модели, резистивная проводимость в данной цепи отсутствует. Однако поскольку имеются проводящие и непроводящие фрагменты, то в дальнейшем можно рассматривать емкостную модель проводимости.

Заключение

В работе представлена имитационная графическая модель внутренней структуры токопроводящего полимера, состоящего из двух компонентов – диэлектрической основы и электропроводящего наполнителя. Оба компонента условно представлены в виде кубических зерен, соединенных между собой в кубические ячейки (каждая ячейка состоит из 27 кубических зерен). При задании электрических характеристик для отдельных зерен предложенная модель позволяет оценить теоретическую проводимость материала в цепях постоянного тока. Однако, поскольку биоэлектрические сигналы имеют нестационарный характер, резистивная модель не будет полностью удовлетворять поставленной задаче, поэтому предложенную модель в перспективе необходимо адаптировать для определения проводимости материала в цепях переменного электрического тока. Модель потенциально возможно использовать для определения электрической проводимости других двухкомпонентных токопроводящих полимеров в цепях постоянного и переменного тока.

Список литературы

1. Лопанова Е. А. Функциональные токопроводящие материалы на основе графита и силикатов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2005. 20 с.
2. Демин В. Л. Реологические аномалии в формировании структуры и свойств токопроводящих полимерных композиционных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 20 с.
3. Мелентьев С. В. Резистивный материал на основе углероднаполненного полиуретана : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 18 с.
4. Фанина Е. А. Технология электропроводящих композитных материалов на основе переходных форм углерода : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2018. 35 с.
5. Физиология человека : в 3 т. / под ред. Р. Шмидта, Г. Тевса ; пер. с англ. Н. Н. Алипова / под ред. П. Г. Костюка. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Мир, 1996.
6. Толкович Д. В. Учебный имитатор электрофизиологических сигналов, выполненный в форме торса человека // Биотехносфера. 2016. № 2. С. 7–11.
7. Ершов Ю. А., Щукин С. И. Основы анализа биотехнических систем: теоретические основы БТС : учеб. пособие. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 528 с.
8. Щербаченко Л. А. Физика диэлектриков : метод. пособие. Иркутск : ГОУ ВПО ИГУ, 2005. 73 с.
9. Охрана труда в машиностроении : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 1983. 160 с.
10. Бадаев А. С., Чернышов А. В. Физические основы микроэлектроники : учеб. пособие. Воронеж : Воронежский гос. технический ун-т, 2011. 20 с.
11. Ананьин С. В., Ананьева Е. С., Маркин В. Б. Композиционные материалы : учеб. пособие. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. Ч. 2. 94 с.
12. Физические свойства каучука. 2020. URL: <https://domrezin.ru/physical-properties-of-rubber.html> (дата обращения: 02.11.2022).
13. Графит и углеграфит – строение и свойства. 2007. URL: <http://www.grafitservis.ru/product/grafit> (дата обращения: 02.11.2022).
14. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. М. ; Л. : Энергия, 1965. 892 с.

References

1. Lopanova E.A. Functional conductive materials based on graphite and silicates. PhD abstract. Belgorod, 2005:20. (In Russ.)
2. Demin V.L. Rheological anomalies in the formation of the structure and properties of conductive polymer composite materials. PhD abstract. Moscow, 2005:20. (In Russ.)
3. Melent'ev S.V. Resistive material based on carbon-filled polyurethane. PhD abstract. Tomsk, 2014:18. (In Russ.)
4. Fanina E.A. Technology of electrically conductive composite materials based on transitional forms of carbon. DSc abstract. Belgorod, 2018:35. (In Russ.)
5. Shmidt R., Tevs G. (ed.) *Fiziologiya cheloveka = Human physiology*. Translated from the English by N. N. Alipov. 2nd ed., reprint. and up. Moscow: Mir, 1996. (In Russ.)
6. Tolkovich D.V. Educational simulator of electrophysiological signals, made in the form of a human torso. *Biotehnosfera = Biotechnosphere*. 2016;(2):7–11. (In Russ.)
7. Ershov Yu.A., Shchukin S.I. *Osnovy analiza biotekhnicheskikh sistem: teoreticheskie osnovy BTS: ucheb. posobie = Fundamentals of analysis of biotechnical systems: theoretical foundations of BTS : textbook*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2011:528. (In Russ.)
8. Shcherbachenko L.A. *Fizika dielektrikov: metod. posobie = Physics of dielectrics : methodological guide*. Irkutsk: GOU VPO IGU, 2005:73. (In Russ.)
9. *Okhrana truda v mashinostroenii: ucheb. posobie = Occupational safety in mechanical engineering : textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 1983:160. (In Russ.)
10. Badaev A.S., Chernyshov A.V. *Fizicheskie osnovy mikroelektroniki: ucheb. posobie = Physical fundamentals of microelectronics : textbook*. Voronezh: Voronezhskiy gos. tekhnicheskiiy un-t, 2011:20. (In Russ.)
11. Anan'in S.V., Anan'eva E.S., Markin V.B. *Kompozitsionnye materialy: ucheb. posobie = Composite materials : textbook*. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2007;(part 2):94. (In Russ.).
12. *Fizicheskie svoystva kauchuka = Physical properties of rubber*. 2020. (In Russ.). Available at: <https://domrezin.ru/physical-properties-of-rubber.html> (accessed 02.11.2022).
13. *Grafit i uglegrafit – stroenie i svoystva = Graphite and carbon graphite – structure and properties*. 2007. (In Russ.). Available at: <http://www.grafitservis.ru/product/grafit> (accessed 02.11.2022).
14. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey = Theory of radio circuits*. Moscow; Leningrad: Energiya, 1965:892. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Владиславович Толкович
регулирующий радиоэлектронной
аппаратуры и приборов,
Научно-производственное
предприятие «Радар ммс»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Новосельковская, д. 37, лит. А)
E-mail: pyby@inbox.ru

Dmitriy V. Tolkovich
Adjuster radio-technician,
Scientific and Production Enterprise
"Radar mms"
(lit. A, 37 Novoselkovskaya street,
St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 23.03.2023
Поступила после рецензирования/Revised 21.05.2023
Принята к публикации/Accepted 07.06.2023

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛИЗИСТОЙ ПОЛОСТИ РТА И ПАРОДОНТА

С. М. Геращенко¹, А. В. Демидов²

^{1, 2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹sgerash@mail.ru, ²demidandrey@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является обзор и анализ современных методов оценки состояния слизистой полости рта и пародонта. *Материалы и методы.* С целью выбора перспективных методов оценки состояния слизистой полости рта и пародонта была разработана классификация методов на основе физического принципа, лежащего в их основе. Был проведен анализ этих методов с точки зрения измеряемого параметра, инвазивности, экспрессности метода и возможности его применения на доклинической стадии заболевания. *Результаты.* Ранняя диагностика заболеваний слизистой полости рта и пародонта в доклинической стадии вследствие обратимости процессов увеличивает шансы полного выздоровления. Это актуально ввиду высокого риска злокачественного перерождения поврежденных мягких тканей слизистой на фоне воспалительных заболеваний. *Выводы.* Выявлены преимущества электрохимических методов диагностики.

Ключевые слова: диагностика пародонтита, хронический генерализованный пародонтит, слизистая оболочка полости рта, конусно-лучевая компьютерная томография, лучевые методы диагностики, ранняя диагностика, инструментальные методы диагностики в стоматологии

Для цитирования: Геращенко С. М., Демидов А. В. Современные методы оценки состояния слизистой полости рта и пародонта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 154–171. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-10

MODERN METHODS FOR ASSESSING THE CONDITION OF THE MUCOSUS CAVITY OF THE MOUTH AND PERIODONT

S.M. Gerashchenko¹, A.V. Demidov²

^{1, 2} Penza State University, Penza, Russia
¹sgerash@mail.ru, ²demidandrey@gmail.com

Abstract. *Background.* The aim of the work is to review and analyze modern methods for assessing the condition of the oral mucosa and periodontium. *Materials and methods.* In order to select promising methods for assessing the condition of the oral mucosa and periodontium, a classification of methods was developed based on the underlying physical principle. An analysis of these methods was also carried out in terms of the measured parameter, invasiveness, rapidity of the method and the possibility of its use at the preclinical stage of the disease. *Results.* Early diagnosis of diseases of the oral mucosa and periodontal disease in the preclinical stage, due to the reversibility of processes, increases the chances of complete recovery. This is relevant due to the high risk of malignant degeneration of damaged

soft tissues of the mucosa against the background of inflammatory diseases. *Conclusions.* The advantages of electrochemical methods of diagnostics are revealed.

Keywords: diagnosis of periodontitis, chronic generalized periodontitis, oral mucosa, cone-beam computed tomography, radiation diagnostic methods, early diagnosis, instrumental diagnostic methods in dentistry

For citation: Gerashchenko S.M., Demidov A.V. Modern methods for assessing the condition of the mucosus cavity of the mouth and periodont. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):154–171. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-10

Введение

В современном мире наблюдается значительное улучшение здоровья населения ряда стран, однако в общественном здравоохранении все еще остаются нерешенные проблемы. Одной из таких проблем является высокая распространенность воспалительных заболеваний слизистой оболочки полости рта (СОПР) и пародонта [1].

На сегодняшний день пародонтит тяжелой степени тяжести встречается у 5–20 % лиц молодого возраста. Признаки поражения пародонтальных тканей выявлены у 41 % подростков, а число лиц в возрасте от 35 до 44 лет, имеющих здоровые ткани пародонта, составило всего 19 % [2].

Многочисленные исследования указывают на то, что несвоевременная диагностика ранних поражений слизистой оболочки полости рта и тканей пародонта приводит к различным системным заболеваниям. Изменения в этих тканях служат индикатором общего состояния организма и зачастую являются ранним признаком системной патологии [3].

Позднюю диагностику заболеваний слизистой оболочки полости рта связывают с недостаточной внимательностью врачей-стоматологов при сборе анамнеза, не всегда выясняются факторы риска, а при непосредственном осмотре полости рта врачи не всегда акцентируют внимание на состоянии мягких тканей (цвет, рельеф, целостность).

На этапе осмотра полости рта следует проводить оценку состояния мягких тканей в соответствии с их топографической зоной, так как в зависимости от местоположения могут различаться архитектура и цветовая гамма.

Тип воспаления и клинические поражения в виде поражений красного, белесоватого оттенков или их сочетаний могут характеризовать конкретное заболевание слизистой оболочки при учете предполагаемой этиологии [4]. Однако поражения зачастую идентичны при различных заболеваниях СОПР, а причины их развития являются многофакторными [5].

Из-за высокого риска злокачественного перерождения поврежденных мягких тканей полости рта на фоне воспалительного процесса требуется разработка методов обнаружения ранних клинических проявлений патологий СОПР и пародонта [6].

В литературный обзор по теме «Современные методы оценки состояния слизистой полости рта и пародонта» были включены статьи за 2013–2022 гг. Поиск происходил по следующим ключевым словам: «диагностика пародонтита», «хронический генерализованный пародонтит», «слизистая оболочка полости рта», «конусно-лучевая компьютерная томография», «лучевые методы диагностики», «ранняя диагностика», «инструментальные методы

диагностики в стоматологии». Всего было проанализировано 112 статей. Из них были отобраны наиболее соответствующие тематике литературного обзора, имеющие полнотекстовые версии. Таким образом, в литературный обзор вошли 52 статьи. Была составлена классификация методов диагностики исходя из физических принципов, лежащих в их основе (рис. 1).

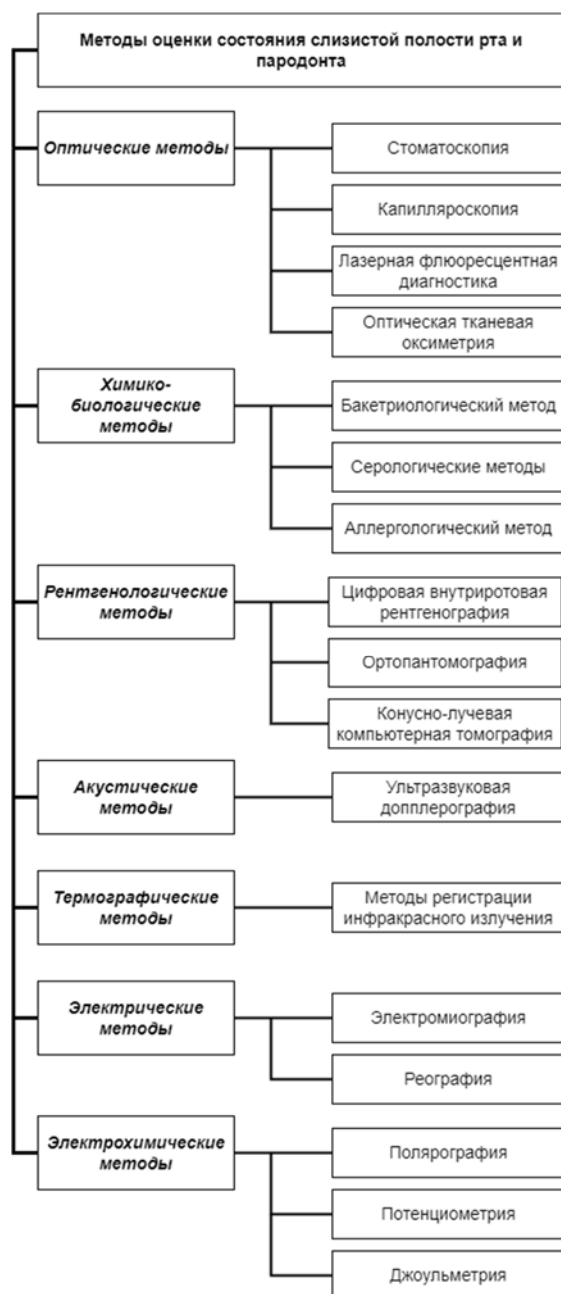


Рис. 1. Классификация методов диагностики слизистой полости рта и пародонта

Клинические методы диагностики в рамках данной работы рассматриваться не будут.

Анализ литературы показал тенденцию к востребованности разработки методов диагностики данных патологий, обладающих такими важными качествами, как возможность доклинической диагностики, минимальная инвазивность при исследовании, а также возможность получения результатов исследования в ходе одного приема у стоматолога.

Таким образом, требуется провести анализ существующих методов диагностики слизистой полости рта и пародонта согласно разработанной классификации и оценить их с точки зрения инвазивности, экспрессности и возможности применения на доклинической стадии развития заболевания.

Оптические методы

Диагностика патологий слизистой полости рта, пародонта и твердых тканей зуба на основе только клинических данных может привести к недооценке распространенности и тяжести данных патологий.

В стоматологии в настоящий момент используют следующие оптические методы диагностики [7]:

- стоматоскопия;
- метод капилляроскопии;
- лазерная флюоресцентная диагностика;
- лазерная доплеровская флоуметрия;
- оптическая тканевая оксиметрия.

В основе люминесцентной стоматоскопии лежит различие в интенсивности и цвете флуорисцирующих тканей полости рта в норме и при патологии.

Данное исследование проводят в затемненной комнате, направляя на высушенную исследуемую поверхность пучок ультрафиолетовых лучей с расстояния 20–30 см.

Люминесцентную стоматоскопию используют в следующих случаях:

- определение краевого прилегания пломб;
- определение начальных поражений твердых тканей зуба;
- обнаружение поражений слизистой оболочки полости рта и пародонта;
- определение первых признаков онкологических изменений тканей полости рта и пародонта.

Одной из разновидностей данного метода является люминесцентно-гистологический метод. Для него применяются специализированные приборы и микроскопы, оборудованные кварцевой лампой с фильтром из темно-фиолетового стекла.

Капилляроскопия – это методика регистрации и расчета капиллярного кровотока [8]. Данный метод представляет собой компьютеризированную микроскопию с кратным увеличением 30–60×. Во время исследования можно увидеть состояние капилляров, а также рассчитать линейную и объемную скорости капиллярного кровотока, что актуально для диагностики начальных стадий патологий пародонта, начинающихся с расстройства регионального микрокапиллярного кровообращения. Недостатком метода является возможность изучения только поверхностного слоя ткани толщиной до 800 мкм.

Лазерная флюоресцентная диагностика основана на эффекте собственного излучения света тканями при поглощении световой волны определенной длины [9]. При этом длина волны собственного излучения будет смещена в область спектра с большей длиной волны. Присутствующие в полости рта продукты обмена веществ бактерий (главным образом молочные кислоты) при

воздействию ультрафиолетом имеют более сильное свечение по сравнению со слизистой полостью рта, тканями пародонта, а также твердыми тканями зуба. По данным, приведенным в работе [10], эффективность данного метода диагностики составляет 82 %.

Устройство для проведения лазерной флюорографии состоит из лазера с излучаемой длиной волны в 655 нм, фильтра, фотоэлемента, а также двух световодов. Фотоэлемент регистрирует интенсивность флуоресцентного излучения, по которому можно судить об активности обмена веществ у микроорганизмов на исследуемом участке.

Для оценки состояния и регуляции кровотока в микроциркуляторном русле возможно применение лазерной доплеровской флоуметрии [10]. Ведущую роль в патогенезе заболеваний пародонта отводят воспалительному процессу. Одним из ранних проявлений воспаления является расстройство микроциркуляции в пораженных тканях.

Суть метода заключается в освещении исследуемой ткани монохроматическим пучком света малой интенсивности. При этом в соответствии с эффектом Доплера движущиеся в сосудах эритроциты приводят к частотному сдвигу отраженного монохроматического света, который через приемный световод попадает на фотоприемник [11]. Далее полученный фототок пересчитывается в объем потока (мл/мин/100 г ткани) согласно алгоритму, приведенному в работе [12].

Преимуществами метода являются неинвазивность, объективность, возможность оценить состояние кровоснабжения пульпы и периодонта. Данный метод чаще всего применяется для оценки витальности пульпы после травмы или для оценки воздействия различных факторов на региональный кровоток [13]. Оценка активности воспаления и отслеживание динамики процесса затруднено при применении данного метода ввиду индивидуальной изменчивости показателей и неустойчивости измеряемой характеристики.

Оптическая тканевая оксиметрия применяется для оценки состояния микроциркуляторного русла биоткани на основе измерения уровня кислородной сатурации крови [14]. Оценка периферической капиллярной оксигенации (SpO₂) возможна из-за разницы оптических свойств оксигенированных и дезоксигенированных фракций гемоглобина, и в норме составляет 87 % и больше [15]. Для этого применяются два лазера, излучающие свет с длинами волн 0,53 мкм (зеленая область спектра) и 0,65 мкм (красная область спектра).

Расчет показателя SpO₂ происходит по формуле

$$SpO_2 = \frac{a_{O_2Hb}}{(a_{O_2Hb} + a_{HHb})} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где a_{O_2Hb} – доля света, поглощенная оксигенированным гемоглобином; a_{HHb} – доля света, поглощенная дезоксигенированным гемоглобином.

Достоинства и недостатки оптической тканевой оксиметрии схожи с лазерной доплеровской флоуметрией. Метод является неинвазивным, экспрессным, однако интерпретация измеряемого параметра с клинической точки зрения затруднена, особенно на доклинической стадии, ввиду неспецифичности параметра SpO₂.

Химико-биологические методы

В группу химико-биологических методов оценки состояния слизистой полости рта и пародонта входят методы идентификации возбудителя

заболеваний (бактериологический или биологический методы) или маркеров его присутствия (иммунологический и серологические методы) [16]. К ним можно отнести аллергологический метод.

Бактериологический метод исследования в стоматологии предполагает анализ микробной и грибковой флоры, полученной с участка поражения. Наиболее часто применяемый метод забора материала – мазок. Может применяться соскоб. Полученный материал исследуют с помощью бактериоскопии (метод визуальной идентификации микрофлоры после окрашивания). Кроме того, исследуют активность роста бактерий, чувствительность к лекарственным препаратам, может применяться заражение животных для исследования патогенной активности [17].

На сегодняшний день отсутствуют универсальные и высокоточные методы определения микрофлоры полости рта. В зависимости от топографии участка ротовой полости может меняться не только количественный, но и качественный состав микрофлоры. Большая часть «нормальной микрофлоры» представлена сапрофитами-комменсалами, которые не наносят вреда своему хозяину [18].

Выделение и идентификацию бактерий осуществляют при помощи аэробного и анаэробного культивирования [19]. Однако не все представители микрофлоры, которые присутствуют при воспалении тканей полости рта (особенно вирулентные штаммы пародонтопатогенных видов [20]), возможно выделить с помощью бактериологического метода. К таким видам можно отнести *Bacteroides forsythus*, *Treponema denticola* [21]. Их участие в патогенезе пародонтита получилось установить при помощи полимеразной цепной реакции.

К серологическим методам в стоматологии можно отнести методы определения антигенов микроорганизмов или тканей на основе реакций иммунитета (например, реакция связывания комплемента).

Полимеразная цепная реакция – один из молекулярно-биологических методов идентификации микроорганизмов [22]. Он позволяет обнаружить последовательности ДНК, являющиеся маркерами присутствия карисогенных и пародонтопатогенных микроорганизмов [23].

Аллергологический метод в стоматологии направлен на выявление повышенной чувствительности организма к определенным антигенам, которые характеризуют определенного возбудителя [24]. Данный метод основан на феномене гиперчувствительности I и IV типов. Его применяют при определении аллергической чувствительности к протезам и частям ортопедических конструкций [25, 26].

Наиболее распространенными являются накожные пробы. Однако результаты накожных проб еще не гарантируют наличие аллергии. По данным, приведенным в работе [16], часть пациентов, проявивших чувствительность к Cr и Ni, пользовались протезами из этих металлов без местных и общих патологических реакций. К тому же для развития аллергической реакции на слизистой полости рта требуется большая концентрация аллергена – в среднем в 5–12 раз [24].

Группу химико-биологических методов оценки состояния слизистой полости рта и пародонта можно охарактеризовать как высокоспецифичные и точные методы постановки окончательного диагноза. Однако их применение сопряжено со значительными временными затратами и они малоприменимы на доклинической стадии заболевания.

Рентгенологические методы

Рентгенологические методы в стоматологии применяются как для постановки диагноза и выбора врачебной тактики, так и для оценки эффективности проводимой терапии, оценки динамики течения заболевания, своевременного выявления осложнений [27]. Основными методами рентген-диагностики являются [28]: цифровая внутриротовая рентгенография, ортопантомография, конусно-лучевая компьютерная томография.

Прицельная внутриротовая рентгенограмма [29] и ортопантомограмма [30] являются двухмерными изображениями трехмерного объекта. Степень искажения пропорций и размеров исследуемого объекта у этих методов зависит от угла направления падения центрального луча рентгеновского пучка, правильности позиционирования аппарата, установки параметров изображения [31].

Томография имеет колоссальную практическую значимость для медицины и стоматологии в частности [32–34]. Трехмерное изображение, получаемое при компьютерной томографии, позволяет исключить искажения и увеличить ценность полученной информации [35].

В отношении постановки диагноза, связанного с нарушениями в слизистой оболочке полости или тканях пародонта, к компьютерной томографии прибегают в следующих клинических ситуациях [36]:

- исследование костной ткани перед имплантацией;
- выявление патологии в тканях пародонта;
- выявление очагов хронического воспаления в периапикальных тканях.

Одним из современных направлений развития рентгенологических комплексов является интеграция их с другими методами исследования объектов, основанными на оптических, электрических, лазерных эффектах [37].

Рентгенологические методы остаются золотым стандартом диагностики в стоматологии ввиду высокой информативности данных методов и высокой скорости выполнения процедуры (экспрессность). Они позволяют не только определить наличие патологии, но и уточнить глубину и характер поражения. Воздействие ионизирующего излучения, а также высокая стоимость и сложность рентгенологических диагностических комплексов являются значительным основанием для разработки альтернативных диагностических методов, лишенных указанных недостатков.

Акустические методы

К акустическим методам диагностики состояния слизистой полости рта и пародонта можно отнести ультразвуковую доплерографию [38]. Метод основан на измерении частоты отраженной от движущегося объекта звуковой волны и расчете на ее основе средней линейной скорости кровотока (см/с) и средней объемной скорости кровотока (мл/с).

Ультразвуковую доплерографию используют для исследования как крупных кровеносных сосудов (1–7 мм), так и микрососудов (до 1 мм) [39]. Для исследования кровотока в тканях пародонта датчик располагают на границе десны и переходной складки в области боковых резцов [40].

Метод ультразвуковой доплерографии является неинвазивным, и его относят к методам ранней диагностики, так как первым признаком патологических изменений тканей наиболее часто выступает снижение регионального кровотока (ишемия тканей) [41]. Особое значение данный метод представляет для хирургов при оценке состояния регионарного кровотока во время травм и операций

на челюстно-лицевой области. К недостаткам ультразвуковой доплерографии можно отнести малое количество информации о состоянии микроциркуляции при различных заболеваниях слизистой полости рта и пародонта [40].

Термографические методы

Термографический метод диагностики основан на регистрации инфракрасного излучения, излучаемого биообъектом [42]. Распределение и интенсивность инфракрасного излучения позволяет получить представление о топографии пораженных участков, а также о функциональных изменениях в пораженной зоне [43]. Современную термографию можно применять для решения следующих медицинских задач [44]:

- опосредованная визуализация пораженного участка;
- уточнение диагноза;
- объективизация клинического синдрома заболевания;
- контроль эффективности лечения.

Одним из основных критериев термографического метода является выявление термоасимметрии. Однако разница в температуре симметрично расположенных участков может возникнуть не только из-за наличия воспалительного процесса, но и из-за физической или психической нагрузки, курения, приема некоторых лекарственных средств и т.д. Все это может привести к диагностическим ошибкам.

Необходимо отметить, что термографический метод позволяет с высокой степенью точности измерить температуру поверхности слизистой и кожи толщиной в доли миллиметра. О температуре подлежащих тканей можно судить лишь опосредованно. К достоинствам термографического метода также можно отнести безопасность проведения манипуляции для врача и пациента, а также экспрессность метода [45]. Недостатком является сложность, связанная с интерпретацией результатов, ввиду значительного влияния внешних факторов на итоговую термограмму.

Таким образом, при комплексной диагностике результаты термографии предоставляют важную дополнительную информацию о наличии и тяжести воспалительных процессов. Кроме того, они позволяют оценить эффективность консервативного лечения. Однако точность данного метода диагностики составляет около 80 % [42] из-за значительного влияния внешних факторов на получаемую термограмму.

Электрические методы

К электрическим методам оценки состояния слизистой полости рта и пародонта можно отнести электромиографию и реографию. Объектом исследования в электромиографии являются потенциалы действия мышечных волокон. Данный метод может применяться для уточнения диагноза у пациентов с заболеваниями пародонта или периодонта [46].

Электромиография в сочетании с гнатодинамометрическими пробами может применяться для оценки функционального состояния периодонта [47]. Для этого сопоставляют интенсивность возбуждения мышц, полученную с помощью электромиографии, с давлением, создаваемым зубочелюстной системой [46]. Недостатком электромиографии является достаточно узкая область применения.

Реография относится к методам исследования кровоснабжения тканей [48]. Суть метода заключается в регистрации изменения полного электрического

сопротивления тканей, вызванного пульсовыми колебаниями кровенаполнения сосудов [49]. При анализе получаемых реограмм учитывают форму кривой, амплитудно-частотные характеристики, а также расчетные показатели пульсового объема кровотока ткани.

Несомненным достоинством реографии является неинвазивность и экспрессность метода, однако, как и в случае оценки состояния регионарного кровотока с помощью ультразвуковой доплерографии, недостатком является низкая специфичность и достаточно ограниченная область применения.

Электрохимические методы

В группу электрохимических методов диагностики вошли полярография, потенциометрический метод определения окислительно-восстановительного потенциала и джоульметрия. Сущность полярографического метода состоит в регистрации зависимости силы тока от приложенного к биообъекту напряжения [50]. На основе полученной кривой происходит расчет напряжения кислорода (pO_2), который является интегральным показателем состояния транскапиллярного обмена. Напряжение кислорода в десне зависит от характера и степени патологического процесса, протекающего в пародонте.

Потенциометрический метод определения окислительно-восстановительного потенциала позволяет оценить степень утилизации кислорода при метаболизме [51]. Для этого измерительный электрод из платины вводят в десну, рядом устанавливают хлорсеребряный электрод. Данный метод является инвазивным и применяется для оценки активности воспаления, так как патологические изменения в тканях пародонта сопровождаются снижением окислительно-восстановительного потенциала.

Джоульметрия представляет собой классический метод исследования биологических объектов, при котором происходит контролируемое воздействие с целью измерения ответной реакции [52]. Для оценки состояния слизистой полости рта и тканей пародонта во время джоульметрического исследования на объект подается импульс тока заданной амплитуды и длительности. В ходе воздействия производится измерение межэлектродного напряжения. Амплитуда и форма полученной кривой позволяют оценить состояние исследуемых тканей.

Полярография и потенциометрический метод определения окислительно-восстановительного потенциала являются объективными, безопасными методами экспресс-оценки состояния тканей пародонта, однако инвазивность процедуры (в случае потенциометрического метода) и оценка косвенной характеристики состояния тканей (в случае полярографии) снижает эффективность и применимость описываемых методов. С помощью джоульметрии, в отличие от описанных методов, производится непосредственная оценка состояния тканей неинвазивным датчиком.

Сравнительный анализ методов оценки состояния слизистой полости рта и пародонта

С целью выбора перспективных методов оценки состояния слизистой полости рта и пародонта разработанная классификация была дополнена следующими критериями: объект исследования, измеряемый параметр, инвазивность метода, экспрессность метода и возможность его применения на доклинической стадии заболевания. Дополненная классификация представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики методов

Физический принцип	Метод	Объект исследования	Измеряемая характеристика	Инвазивность	Экспрессность	Применимость на доклинической стадии
1	2	3	4	5	6	7
Оптические методы	Стоматоскопия	Слизистая полости рта	Флюоресценция тканей	Нет	Да	Нет
	Капилляроскопия	Капиллярный кровоток	Линейная скорость кровотока	Нет	Да	Нет
	Лазерная флуоресцентная диагностика	Слизистая полости рта и пародонт	Флюоресценция тканей	Нет	Да	Нет
	Оптическая тканевая оксиметрия	Капиллярный кровоток	Линейная скорость кровотока	Нет	Да	Нет
Химико-биологические методы	Бактериологический метод	Микрофлора полости рта	Количественный и видовой состав микрофлоры	Нет	Нет	Нет
	Серологические методы	Антигены микроорганизмов	Наличие антигенов патогенных микроорганизмов	Нет	Нет	Нет
	Аллергологические методы	Слизистая полости рта и кожа	Наличие аллергической реакции на антигены	Да	Нет	Нет
Рентгенологические методы	Цифровая внутриротовая рентгенография	Слизистая полости рта и пародонт	Двухмерное рентген-изображение тканей	Нет	Да	Нет
	Ортопантомография	Слизистая полости рта и пародонт	Двухмерное рентген-изображение тканей	Нет	Да	Нет
	Конусно-лучевая томография	Слизистая полости рта и пародонт	Трехмерное рентген-изображение тканей	Нет	Да	Нет

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Акустические методы	Ультразвуковая доплерография	Микроциркуляторное русло	Линейная и объемная скорость кровотока	Нет	Да	Нет
Термографические методы	Методы регистрации инфракрасного излучения	Слизистая полости рта и пародонт	Термограмма	Нет	Нет	Нет
Электрические методы	Электромиография	Мышечная тканей челюстно-лицевой области	Потенциалы действия мышц	Да	Нет	Нет
	Реография	Слизистая полости рта и пародонт	Колебания электрического сопротивления тканей	Нет	Нет	Нет
Электрохимические методы	Полярография	Слизистая полости рта и пародонт	Зависимость силы тока от приложенного к биообъекту напряжения	Нет	Да	Да
	Потенциометрия	Слизистая полости рта и пародонт	Напряжение кислорода в тканях	Да	Да	Да
	Джоульметрия	Слизистая полости рта и пародонт	Изменение напряжения при воздействии на ткани импульса тока	Нет	Да	Да

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что единственной группой методов, способных на доклинической стадии обнаружить изменения в слизистой полости рта и тканях пародонта, являются электрохимические методы. На сегодняшний день данная группа методов в стоматологии представлена полярографией, потенциометрией и джоульметрией. В полярографии и потенциометрии измеряется важная, но косвенная характеристика состояния тканей, а именно состояние кровотока. К электрохимическим методам, при которых происходит непосредственная оценка состояния слизистой полости рта, можно отнести джоульметрию [52]. На данный момент метод является экспериментальным, и требуется проведение дополнительных исследований для оценки его эффективности и возможности применения его в практической стоматологии.

Выводы

Ранняя диагностика заболеваний слизистой полости рта и пародонта на доклинической стадии вследствие обратимости процессов увеличивает шансы полного выздоровления. Это актуально ввиду высокого риска злокачественного перерождения поврежденных мягких тканей слизистой на фоне воспалительных заболеваний. Сравнительный анализ методов классификации с точки зрения объекта исследования, измеряемого параметра, а также бинарных признаков (инвазивность метода, экспрессность метода и возможности его применения на доклинической стадии) позволил выявить преимущества электрохимических методов диагностики. Внедрение новых электрохимических методов доклинической экспресс-диагностики позволило бы снизить количество пациентов с хроническим пародонтитом и другими воспалительными заболеваниями слизистой полости рта и пародонта.

Список литературы

1. Global oral health status report: towards universal health coverage for oral health by 2030. URL: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240061484> (дата обращения: 03.04.2023).
2. Петерсен П. Э., Кузьмина Э. М. Распространенность стоматологических заболеваний. Факторы риска и здоровье полости рта. Основные проблемы общественного здравоохранения // Форум стоматологии. 2017. № 1. С. 2–11.
3. Капранова В. В., Асадов Р. И., Дорохова В. Д. Пародонтит как актуальная проблема стоматологии // Стоматология славянских государств. 2017. № 1. С. 196–199.
4. Латышева С. В., Будевская Т. В. Анализ выявленных поражений слизистой оболочки ротовой полости при первичном приеме пациентов // Современная стоматология. 2017. № 1. С. 34–37.
5. Гажва С. И., Степанян Т. Б., Горячева Т. П. Распространенность стоматологических заболеваний слизистой оболочки полости рта и их диагностика // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 5-1. С. 41–44.
6. Алиев А. Д. Молекулярные маркеры лейкоплакии и прогноз малигнизации // Биомедицина. 2013. № 2. С. 3–7.
7. Редуто К. В., Казеко Л. А. Оптические методы исследований в стоматологии // Современная стоматология. 2013. № 1. С. 13–16.
8. Elashiry M., Meghil M. M., Arce R. M., Cutler C. W. From manual periodontal probing to digital 3-D imaging to endoscopic capillaroscopy: Recent advances in periodontal disease diagnosis // Journal of periodontal research. 2019. № 1. P. 1–9.

9. Maheshwari S., Jaan A., Yousuf A. [et al.]. Laser and its implications in dentistry: A review article // *Journal of Current Medical Research and Opinion*. 2020. № 08. P. 579–588.
10. Бархатов И. В. Применение лазерной доплеровской флоуметрии для оценки нарушений системы микроциркуляции крови человека // *Казанский медицинский журнал*. 2014. № 1. С. 63–69.
11. Ghouth N., Duggal M. S., BaniHani A., Nazzal H. The diagnostic accuracy of laser Doppler flowmetry in assessing pulp blood flow in permanent teeth: A systematic review // *Dental Traumatology*. 2018. № 5. P. 311–319.
12. Македонова Ю. А., Поройский С. В., Фирсова И. В., Федотова Ю. М. Лазерная доплеровская флоуметрия при заболеваниях слизистой полости рта // *Волгоградский научно-медицинский журнал*. 2016. № 1. С. 51–53.
13. Кречина Е. К., Гусева И. Е., Погабало И. В. [и др.]. Современные достижения функциональной диагностики в стоматологии // *Стоматология*. 2022. № 4. С. 30–33.
14. Janani K., Ajitha P., Sandhya R. [et al.]. Efficiency of new custom-made pulse oximeter sensor holder in assessment of actual pulp status // *Journal of Family Medicine and Primary Care*. 2020. № 7. P. 3333.
15. Bruno K. F., Barletta F. B., Felipe W. T. [et al.]. Oxygen saturation in the dental pulp of permanent teeth: a critical review // *Journal of endodontics*. 2014. № 8. P. 1054–1057.
16. Маслов Р. М., Прозорова Н. В., Бакало Ю. В. [и др.]. Методы диагностики и определения инфекционных заболеваний полости рта. Методы исследования в стоматологии // *Актуальные вопросы фундаментальной, клинической медицины и фармации*. 2020. № 1. С. 111–116.
17. Heboyan A., Mahrikyan M., Zafar M. S. [et al.]. Bacteriological evaluation of gingival crevicular fluid in teeth restored using fixed dental prostheses: An in vivo study // *International journal of molecular sciences*. 2021. № 11. P. 5463.
18. Hsiao W. W. L., Li K. L., Liu Z. [et al.]. Microbial transformation from normal oral microbiota to acute endodontic infections // *BMC genomics*. 2012. Vol. 13. P. 1–15.
19. Tanner A. C. R. Anaerobic culture to detect periodontal and caries pathogens // *Journal of oral biosciences*. 2015. № 1. P. 18–26.
20. Mohanty R., Asopa S. J., Joseph M. P. [et al.]. Red complex: Polymicrobial conglomerate in oral flora: A review // *Journal of family medicine and primary care*. 2019. № 11. P. 3480.
21. Marttila E., Sorsa T., Kari K. [et al.]. Intracellular localization of *Treponema denticola* chymotrypsin-like proteinase in chronic periodontitis // *Journal of oral microbiology*. 2014. № 1. P. 24349.
22. Oliveira F. A. F., Forte C. D. F., Lopes C. B. [et al.]. Molecular analysis of oral bacteria in heart valve of patients with cardiovascular disease by real-time polymerase chain reaction // *Medicine*. 2015. № 47. P. 1–5.
23. Carinci F., Scapoli L., Girardi A. [et al.]. Oral microflora and periodontal disease: new technology for diagnosis in dentistry // *Annali di stomatologia*. 2013. № 2. P. 170–173.
24. Титов П. Л., Мойсейчик П. Н., Матвеев А. М. Аллергические реакции к компонентам стоматологических материалов. Диагностика // *Современная стоматология*. 2017. № 2. С. 28–33.
25. Balcheva-Eneva M., Krasteva A., Nikolov G. [et al.]. Oral allergy syndrome and dental allergology // *Journal of IMAB – Annual Proceeding Scientific Papers*. 2013. № 4. P. 332–335.
26. Syed M., Chopra R., Sachdev V. Allergic reactions to dental materials-a systematic review // *Journal of clinical and diagnostic research*. 2015. № 10. P. 4.
27. Чибисова М. А., Батюков Н. М. Методы рентгенологического обследования и современной лучевой диагностики, используемые в стоматологии // *Институт стоматологии*. 2020. № 3. С. 24–33.

28. Masthoff M., Gerwing M., Timme M. [et al.]. Dental imaging – a basic guide for the radiologist // *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*. 2019. № 03. P. 192–198.
29. Delantoni A., Orhan K. Basic Principles of Intraoral Radiography // *Atlas of Dentomaxillofacial Anatomical Imaging*. 2022. № 1. P. 7–13.
30. Izzetti R., Nisi M., Nardi C. [et al.]. Basic knowledge and new advances in panoramic radiography imaging techniques: A narrative review on what dentists and radiologists should know // *Applied Sciences*. 2021. № 17. P. 7858.
31. Шлейко В. В., Жолудев С. Е. Компьютерная томография как основной инструмент при планировании и прогнозировании комплексного стоматологического лечения // *Проблемы стоматологии*. 2013. № 2. С. 55–57.
32. Venkatesh E., Elluru S. V. Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry // *Journal of Istanbul University faculty of Dentistry*. 2017. № 3. P. 102.
33. Jacobs R., Salmon B., Codari M. [et al.]. Cone beam computed tomography in implant dentistry: recommendations for clinical use // *BMC Oral Health*. 2018. № 1. P. 1–16.
34. Acar B., Kamburoğlu K. Use of cone beam computed tomography in periodontology // *World journal of radiology*. 2014. № 5. P. 139.
35. Avsever H., Gunduz K., Orhan K. [et al.]. Comparison of intraoral radiography and cone-beam computed tomography for the detection of horizontal root fractures: an in vitro study // *Clinical oral investigations*. 2014. № 18. P. 285–292.
36. Чибисова М. А., Орехова Л. Ю., Серова Н. В. Особенности методики диагностического обследования пациентов с заболеваниями пародонта на конусно-лучевом компьютерном томографе // *Институт стоматологии*. 2014. № 1. С. 84–87.
37. Петренко К. А. Перспективные методы рентгенологического исследования в стоматологии // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2016. № 1. С. 32–35.
38. Narang D. Ultrasound in dentistry // *International Journal of Dental Research*. 2022. № 4. P. 1.
39. Kocasarac H. D., Angelopoulos C. Ultrasound in dentistry: toward a future of radiation-free imaging // *Dental Clinics*. 2018. № 3. P. 481–489.
40. Орехова Л. Ю., Лобода Е. С., Нино Я. Значение ультразвуковой доплерографии в динамике лечения воспалительных заболеваний пародонта // *Евразийский союз ученых*. 2016. № 30. С. 89–94.
41. Orekhova L. Y., Barmasheva A. A. Doppler flowmetry as a tool of predictive, preventive and personalised dentistry // *EPMA Journal*. 2013. № 4. P. 1–8.
42. Саркисян Н. Г., Готлиб В. М., Воложанина В. А. Тепловизионная диагностика в стоматологии // *Вестник Уральского государственного медицинского университета*. 2019. № 3. С. 144–147.
43. Nasution A. I., Pankov M. N. The Advantage and Basic Approach of Infrared Thermography in Dentistry // *Journal of International Dental and Medical Research*. 2020. № 2. P. 731–737.
44. Дурново Е. А., Потехина Ю. П., Марочкина М. С. [и др.]. Диагностические возможности инфракрасной термографии в обследовании больных с заболеваниями челюстно-лицевой области // *Современные технологии в медицине*. 2014. № 2. С. 61–67.
45. Harshavardhan T., Vijayalaxmi N., Mudavath M., Meesala D. Thermography: A newer diagnostic assessment tool in dentistry // *Journal of Mahatma Gandhi Institute of Medical Sciences*. 2017. № 2. P. 87.
46. Леонтьев В. К., Иванова Г. Г. Методы исследования в стоматологии (Обзор литературы) (Часть III) // *Институт стоматологии*. 2014. № 2. С. 88–90.
47. Nishi S. E., Basri R., Alam M. K. Uses of electromyography in dentistry: An overview with meta-analysis // *European journal of dentistry*. 2016. № 3. P. 419–425.
48. Aliev N. H. Clinical and functional methods of assessment and diagnosis of the pathological condition of the temporomandibular joint // *New day in medicine*. 2021. № 1. P. 375–380.

49. Амхадова М. А., Мустафаев Н. М., Ашхадов И. С. [и др.]. Состояние регионарного кровотока в слизистой оболочке десны до и после костнопластической операции у пациентов со значительной атрофией альвеолярного отростка // Современная стоматология: проблемы, задачи, решения. 2019. № 1. С. 13–18.
50. Abdulbari H. A., Basheer E. A. M. Electrochemical biosensors: electrode development, materials, design, and fabrication // ChemBioEng Reviews. 2017. № 2. P. 92–105.
51. Тлустенко В. П., Тлустенко В. С., Головина Е. С., Кошелев В. А. Влияние хронического локализованного пародонтита и дентального периимпантата на гомеостаз полости рта // Пульс. 2017. № 11. С. 102–106.
52. Demidov A. V., Udaltsova E. V., Gerashchenko S. M. Development of the System for Assessment of Periodontal Tissue State // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. 2021. № 1. P. 27–29.

References

1. *Global oral health status report: towards universal health coverage for oral health by 2030*. Available at: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240061484> (accessed 03.04.2023).
2. Petersen P.E., Kuz'mina E.M. Prevalence of dental diseases. Risk factors and oral health. The main problems of public health. *Forum stomatologii = Dentistry Forum*. 2017;(1):2–11. (In Russ.)
3. Kapranova V.V., Asadov R.I., Dorokhova V.D. Periodontitis as an actual problem of dentistry. *Stomatologiya slavyanskikh gosudarstv = Dentistry of Slavic states*. 2017;(1): 196–199. (In Russ.)
4. Latysheva S.V., Budevskaya T.V. Analysis of the revealed lesions of the oral mucosa at the initial admission of patients. *Sovremennaya stomatologiya = Modern dentistry*. 2017;(1):34–37. (In Russ.)
5. Gazhva S.I., Stepanyan T.B., Goryacheva T.P. Prevalence of dental diseases of the oral mucosa and their diagnosis. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014; (5-1):41–44. (In Russ.)
6. Aliev A.D. Molecular markers of leukoplakia and prognosis of malignancy. *Biomeditsina = Biomedicine*. 2013;(2):3–7. (In Russ.)
7. Reduto K.V., Kazeko L.A. Optical research methods in dentistry. *Sovremennaya stomatologiya = Modern dentistry*. 2013;(1):13–16. (In Russ.)
8. Elashiry M., Meghil M.M., Arce R.M., Cutler C.W. From manual periodontal probing to digital 3-D imaging to endoscopic capillaroscopy: Recent advances in periodontal disease diagnosis. *Journal of periodontal research*. 2019;(1):1–9.
9. Maheshwari S., Jaan A., Yousuf A. et al. Laser and its implications in dentistry: A review article. *Journal of Current Medical Research and Opinion*. 2020;(08):579–588.
10. Barkhatov I.V. Application of laser Doppler flowmetry to assess violations of the human blood microcirculation system. *Kazanskiy meditsinskiy zhurnal = Kazan Medical Journal*. 2014;(1):63–69. (In Russ.)
11. Ghouth N., Duggal M.S., BaniHani A., Nazzal H. The diagnostic accuracy of laser Doppler flowmetry in assessing pulp blood flow in permanent teeth: A systematic review. *Dental Traumatology*. 2018;(5):311–319.
12. Makedonova Yu.A., Poroyskiy S.V., Firsova I.V., Fedotova Yu.M. Laser Doppler flowmetry in diseases of the oral mucosa. *Volgogradskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal = Volgograd Scientific medical Journal*. 2016;(1):51–53. (In Russ.)
13. Krechina E.K., Guseva I.E., Pogabalo I.V. et al. Modern achievements of functional diagnostics in dentistry. *Stomatologiya = Dentistry*. 2022;(4):30–33. (In Russ.)
14. Janani K., Ajitha P., Sandhya R. et al. Efficiency of new custom-made pulse oximeter sensor holder in assessment of actual pulp status. *Journal of Family Medicine and Primary Care*. 2020;(7):3333.
15. Bruno K.F., Barletta F.B., Felipe W.T. et al. Oxygen saturation in the dental pulp of permanent teeth: a critical review. *Journal of endodontics*. 2014;(8):1054–1057.

16. Maslov R.M., Prozorova N.V., Bakalo Yu.V. et al. Methods of diagnosis and determination of infectious diseases of the oral cavity. *Aktual'nye voprosy fundamental'noy, klinicheskoy meditsiny i farmatsii = Topical issues of fundamental, clinical medicine and pharmacy*. 2020;(1):111–116. (In Russ.)
17. Heboyan A., Mahrikyan M., Zafar M.S. et al. Bacteriological evaluation of gingival crevicular fluid in teeth restored using fixed dental prostheses: An in vivo study. *International journal of molecular sciences*. 2021;(11):5463.
18. Hsiao W.W. L., Li K.L., Liu Z. et al. Microbial transformation from normal oral microbiota to acute endodontic infections. *BMC genomics*. 2012;13:1–15.
19. Tanner A.C.R. Anaerobic culture to detect periodontal and caries pathogens. *Journal of oral biosciences*. 2015;(1):18–26.
20. Mohanty R., Asopa S.J., Joseph M.P. et al. Red complex: Polymicrobial conglomerate in oral flora: A review. *Journal of family medicine and primary care*. 2019;(11):3480.
21. Marttila E., Sorsa T., Kari K. et al. Intracellular localization of *Treponema denticola* chymotrypsin-like proteinase in chronic periodontitis. *Journal of oral microbiology*. 2014;(1):24349.
22. Oliveira F.A.F., Forte C.D.F., Lopes C.B. et al. Molecular analysis of oral bacteria in heart valve of patients with cardiovascular disease by real-time polymerase chain reaction. *Medicine*. 2015;(47):1–5.
23. Carinci F., Scapoli L., Girardi A. et al. Oral microflora and periodontal disease: new technology for diagnosis in dentistry. *Annali di stomatologia*. 2013;(2):170–173.
24. Titov P.L., Moyseychik P.N., Matveev A.M. Allergic reactions to components of dental materials. Diagnostics. *Sovremennaya stomatologiya = Modern dentistry*. 2017;(2):28–33. (In Russ.)
25. Balcheva-Eneva M., Krasteva A., Nikolov G. et al. Oral allergy syndrome and dental allergology. *Journal of IMAB – Annual Proceeding Scientific Papers*. 2013;(4):332–335.
26. Syed M., Chopra R., Sachdev V. Allergic reactions to dental materials-a systematic review. *Journal of clinical and diagnostic research*. 2015;(10):4.
27. Chibisova M.A., Batyukov N.M. Methods of X-ray examination and modern radiation diagnostics used in dentistry. *Institut stomatologii = Institute of Dentistry*. 2020;(3):24–33. (In Russ.)
28. Masthoff M., Gerwing M., Timme M. et al. Dental imaging – a basic guide for the radiologist. *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*. 2019;(03):192–198.
29. Delantoni A., Orhan K. Basic Principles of Intraoral Radiography. *Atlas of Dentomaxillofacial Anatomical Imaging*. 2022;(1):7–13.
30. Izzetti R., Nisi M., Nardi C. et al. Basic knowledge and new advances in panoramic radiography imaging techniques: A narrative review on what dentists and radiologists should know. *Applied Sciences*. 2021;(17):7858.
31. Shleyko V.V., Zholudev S.E. Computed tomography as the main tool in planning and predicting complex dental treatment. *Problemy stomatologii = Problems of dentistry*. 2013;(2):55–57. (In Russ.)
32. Venkatesh E., Elluru S.V. Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry. *Journal of istanbul University faculty of Dentistry*. 2017;(3):102.
33. Jacobs R., Salmon B., Codari M. et al. Cone beam computed tomography in implant dentistry: recommendations for clinical use. *BMC Oral Health*. 2018;(1):1–16.
34. Acar B., Kamburoğlu K. Use of cone beam computed tomography in periodontology. *World journal of radiology*. 2014;(5):139.
35. Avsever H., Gunduz K., Orhan K. et al. Comparison of intraoral radiography and cone-beam computed tomography for the detection of horizontal root fractures: an in vitro study. *Clinical oral investigations*. 2014;(18):285–292.
36. Chibisova M.A., Orekhova L.Yu., Serova N.V. Features of diagnostic examination methodology patients with periodontal diseases on a cone-beam computed tomograph. *Institut stomatologii = Institute of Dentistry*. 2014;(1):84–87. (In Russ.)

37. Petrenko K.A. Promising methods of X-ray examination in dentistry. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2016;(1):32–35. (In Russ.)
38. Narang D. Ultrasound in dentistry. *International Journal of Dental Research*. 2022;(4):1.
39. Kocasarac H.D., Angelopoulos C. Ultrasound in dentistry: toward a future of radiation-free imaging. *Dental Clinics*. 2018;(3):481–489.
40. Orekhova L.Yu., Loboda E.S., Nino Ya. The importance of ultrasound dopplerography in the dynamics of treatment of inflammatory periodontal diseases. *Evrasiyskiy soyuz uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2016;(30):89–94. (In Russ.)
41. Orekhova L.Y., Barmasheva A.A. Doppler flowmetry as a tool of predictive, preventive and personalised dentistry. *EPMA Journal*. 2013;(4):1–8.
42. Sarkisyan N.G., Gotlib V.M., Volozhanina V.A. Thermal imaging diagnostics in dentistry. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Ural State Medical University*. 2019;(3):144–147. (In Russ.)
43. Nasution A.I., Pankov M.N. The Advantage and Basic Approach of Infrared Thermography in Dentistry. *Journal of International Dental and Medical Research*. 2020;(2):731–737.
44. Durnovo E.A., Potekhina Yu.P., Marochkina M.S. et al. Diagnostic capabilities of infrared thermography in examination of patients with diseases of the maxillofacial region. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern technologies in medicine*. 2014;(2):61–67. (In Russ.)
45. Harshavardhan T., Vijayalaxmi N., Mudavath M., Meesala D. Thermography: A newer diagnostic assessment tool in dentistry. *Journal of Mahatma Gandhi Institute of Medical Sciences*. 2017;(2):87.
46. Leont'ev V.K., Ivanova G.G. Research methods in dentistry (Literature review) (Part III). *Institut stomatologii = Institute of Dentistry*. 2014;(2):88–90. (In Russ.)
47. Nishi S.E., Basri R., Alam M.K. Uses of electromyography in dentistry: An overview with meta-analysis. *European journal of dentistry*. 2016;(3):419–425.
48. Aliev N.H. Clinical and functional methods of assessment and diagnosis of the pathological condition of the temporomandibular joint. *New day in medicine*. 2021;(1):375–380.
49. Amkhadova M.A., Mustafaev N.M., Ashkhadov I.S. et al. The state of regional blood flow in the mucosa gingival membrane before and after bone plastic surgery in patients with significant atrophy of the alveolar process. *Sovremennaya stomatologiya: problemy, zadachi, resheniya = Modern dentistry: problems, tasks, solutions*. 2019;(1):13–18. (In Russ.)
50. Abdulbari H.A., Basheer E.A.M. Electrochemical biosensors: electrode development, materials, design, and fabrication. *ChemBioEng Reviews*. 2017;(2):92–105.
51. Tlustenko V.P., Tlustenko V.S., Golovina E.S., Koshelev V.A. Influence of chronic localized periodontitis and dental peri-implantitis on homeostasis of the oral cavity. *Pul's = Pulse*. 2017;(11):102–106. (In Russ.)
52. Demidov A.V., Udaltsova E.V., Gerashchenko S.M. Development of the System for Assessment of Periodontal Tissue State. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology*. 2021;(1):27–29.

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Михайлович Геращенко
 доктор технических наук, доцент,
 профессор кафедры медицинской
 кибернетики и информатики,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: sgerash@mail.ru

Sergey M. Gerashchenko
 Doctor of technical sciences, associate
 professor, professor of the sub-department
 of medical cybernetics and informatics,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Владимирович Демидов

аспирант кафедры медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: demidandrey@gmail.com

Andrey V. Demidov

Postgraduate student of the sub-department
of medical cybernetics and informatics,
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 13.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2023

Принята к публикации/Accepted 07.06.2023

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕГИОНОВ

А. С. Бождай¹, В. В. Свиридова²

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

² ООО «БИ Телеком», Москва, Россия

¹bozhday@yandex.ru, ²vladachess@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Кардинальная цифровая трансформация организационных систем и необходимость управления этим процессом обуславливают ведущее место «сквозных» цифровых технологий, применимых в социально-экономических сферах субъектов Российской Федерации. Важнейшими элементами мониторинга динамических изменений осуществляемых процессов становятся достоверная и репрезентативная информация и технологии ее обработки, включая математические и инструментальные методы. Целью данного исследования является разработка методики численной оценки уровня цифровой трансформации по приоритетным направлениям социально-экономических процессов регионов, включающей локальные и комплексные рейтинговые индексы в части внедрения «сквозных» цифровых технологий. *Материалы и методы.* Исследование проведено с помощью теории индексного метода, включая аддитивную модель факторного анализа. Базой исследования являются показатели развития «сквозных» технологий, определенных в региональных стратегиях цифровой трансформации ключевых отраслей экономики, социальной сферы, государственного управления в целях достижения их «цифровой зрелости», материалы Единой межведомственной информационно-статистической системы. *Результаты.* Представлены виды и характеристика пяти локальных индексов-индикаторов, дающих в совокупности комплексную оценку уровня цифровой трансформации регионов по основным направлениям внедрения «сквозных» цифровых технологий. *Выводы.* Предложенная методика численной оценки цифровой трансформации социально-экономической среды применима для расчета индексов цифровой трансформации и является перспективной для представления и обработки данных в разрезе регионов, повышения точности результатов оценки и измеряющей влияние региональной специфики. Это обеспечит корректное определение позиций регионов по приоритетным направлениям развития. Предложенная модель послужит основой для программно-технической реализации системы мониторинга и анализа данных цифровой трансформации регионов. Ее разработка и применение обеспечат информационную поддержку лиц, принимающих решения в области стратегического планирования и внедрения технологических инноваций в масштабе отдельных регионов страны.

Ключевые слова: система индексов, методика численной оценки, индикаторы цифровой трансформации, «сквозные» цифровые технологии, оценка уровня цифровой трансформации регионов

Для цитирования: Бождай А. С., Свиридова В. В. Методика численной оценки уровня цифровой трансформации приоритетных направлений социально-экономических процессов регионов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 172–184. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-11

METHOD FOR NUMERICAL ASSESSMENT OF THE LEVEL OF DIGITAL TRANSFORMATION OF PRIORITY DIRECTIONS OF SOCIO-ECONOMIC PROCESSES OF THE REGIONS

A.S. Bozhday¹, V.V. Sviridova²

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

² LLC BI Telecom, Moscow, Russia

¹ bozhday@yandex.ru, ² vladachess@mail.ru

Abstract. *Background.* The cardinal digital transformation of organizational systems and the need to manage this process determine the leading place for «end-to-end» digital technologies applicable in the socio-economic spheres of the constituent entities of the Russian Federation. Reliable and representative information and technologies for its processing, including mathematical and instrumental methods, become the most important elements of monitoring dynamic changes in ongoing processes. The purpose of this study is to develop a methodology for numerical assessment of the level of digital transformation in priority areas of socio-economic processes in the regions, including local and complex rating indices in terms of the introduction of «end-to-end» digital technologies. *Materials and methods.* The study was performed using the theory of the index method, including the additive model of factor analysis. The basis of the study is indicators of the development of «end-to-end» technologies defined in the regional strategies for digital transformation of key sectors of the economy, social sphere, public administration to achieve their «digital maturity», materials of the Unified Interdepartmental Information and Statistical System. *Results.* The article presents the types and characteristics of five local indexes-indicators, which together give a comprehensive assessment of the level of digital transformation of regions in the main areas of introduction of «end-to-end» digital technologies. *Conclusions.* The proposed method for the numerical assessment of the digital transformation of the socio-economic environment is applicable for calculating digitalization indices and is promising for presenting and processing data by regions, improving the accuracy of the assessment results and measuring the impact of regional specifics. This will ensure a more correct determination of the positions of the regions in priority areas of development. The proposed model will serve as the basis for the software and hardware implementation of the monitoring and data analysis system for the digital transformation of regions. Its development and application will provide information support to decision makers in the field of strategic planning and implementation of technological innovations on a scale of individual regions of the country.

Keywords: index system, numerical assessment methodology, indicators of digital transformation, "end-to-end" digital technologies, assessment of the level of digital transformation of regions

For citation: Bozhday A.S., Sviridova V.V. Method for numerical assessment of the level of digital transformation of priority directions of socio-economic processes of the regions. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):172–184. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-11

Введение

Принятая стратегия в области цифровой трансформации регионов до 2030 г. повлияла на возрастание ее роли в следующих направлениях: здравоохранении, образовании, транспорте, развитии городской среды, государственном управлении и социальной сфере [1]. Важным является заявление премьер-министра Российской Федерации М. В. Мишустина о необходимости перехода к опережающей модели экономики [2].

Готовность организационных систем к проведению изменений и необходимость управления этим процессом могут быть использованы в механизме мониторинга.

Наибольшее влияние на развитие социально-экономической сферы регионов оказывают «сквозные» цифровые технологии (нейротехнологии и искусственный интеллект (ИИ), компоненты робототехники и сенсорики, большие данные, системы распределенного реестра) (СЦТ). В связи с этим они должны занимать центральное место в методике численной оценки уровня цифровой трансформации приоритетных направлений социально-экономических процессов регионов, включая оценку эффекта от их внедрения.

В исследованных математических моделях и методиках оценки уровня цифровизации и цифровой трансформации регионов, предлагаемых учеными и аналитиками, применяются индексные [3–6], матричные и графовые [7] методы и методы нечетких множеств [8], многофакторный и системный анализ [9, 10]. Однако следует учитывать, что система показателей, разработанная на основе критериев цифровой трансформации, прежде всего формируется в нормативных правовых актах [11] и является основой для расчета комплексного целевого показателя – индекса. В частности, с января 2022 г. в открытых данных Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) [12] публикуется целевой показатель – достижение «цифровой зрелости» ключевых отраслей экономики и социальной сферы, в том числе здравоохранения и образования, а также государственного управления, в целом по России.

Для определения результатов цифровизации в каждой отрасли и во всех регионах утверждено положение о системе управления реализацией национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [13] с установлением задачи выбора приоритетов цифровой трансформации в каждом субъекте РФ и, соответственно, разработки индекса цифровизации регионов для проведения мониторинга. Так, при реализации национального проекта «Цифровая экономика» [14] планируется ранжировать субъекты РФ в рамках Национального индекса развития цифровой экономики России [15].

Целью данного исследования является разработка методики численной оценки уровня цифровой трансформации по приоритетным направлениям социально-экономических процессов регионов, включающей локальные и комплексные рейтинговые индексы в части внедрения СЦТ.

Многообразие задач мониторинга уровня цифровизации социально-экономического развития регионов вызывает необходимость сосредоточиться на разработке системы показателей и индексов, формируемых на основе итоговых данных анализируемых направлений. В связи с этим требуется математическое, информационно-аналитическое и техническое обеспечение для сбора, обработки, хранения и анализа данных с целью принятия обоснованных решений на основе результатов построенных региональных рейтингов.

При большом количестве исследуемых показателей Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций (далее – Минцифры России) федеральным и региональным органам исполнительной власти (ФОИВ и РОИВ) целесообразно выстраивать позиции регионов по результатам оценки цифровой трансформации приоритетных направлений развития, нивелирующей их различия в математической модели.

Материалы и методы

Методика численной оценки характеризует этапы мониторинга от сбора данных до принятия решений, а также показывает взаимосвязь функциональных возможностей системы. Моделирование выполнено с целью разработки системы индексов и индикаторов, определяющих уровень внедрения цифровых решений в социально-экономическую сферу субъектов РФ в рамках национальных проектов и региональных стратегий.

Этапы построения методики комплексной оценки уровня цифровой трансформации приоритетных направлений социально-экономических процессов представлены на рис. 1.

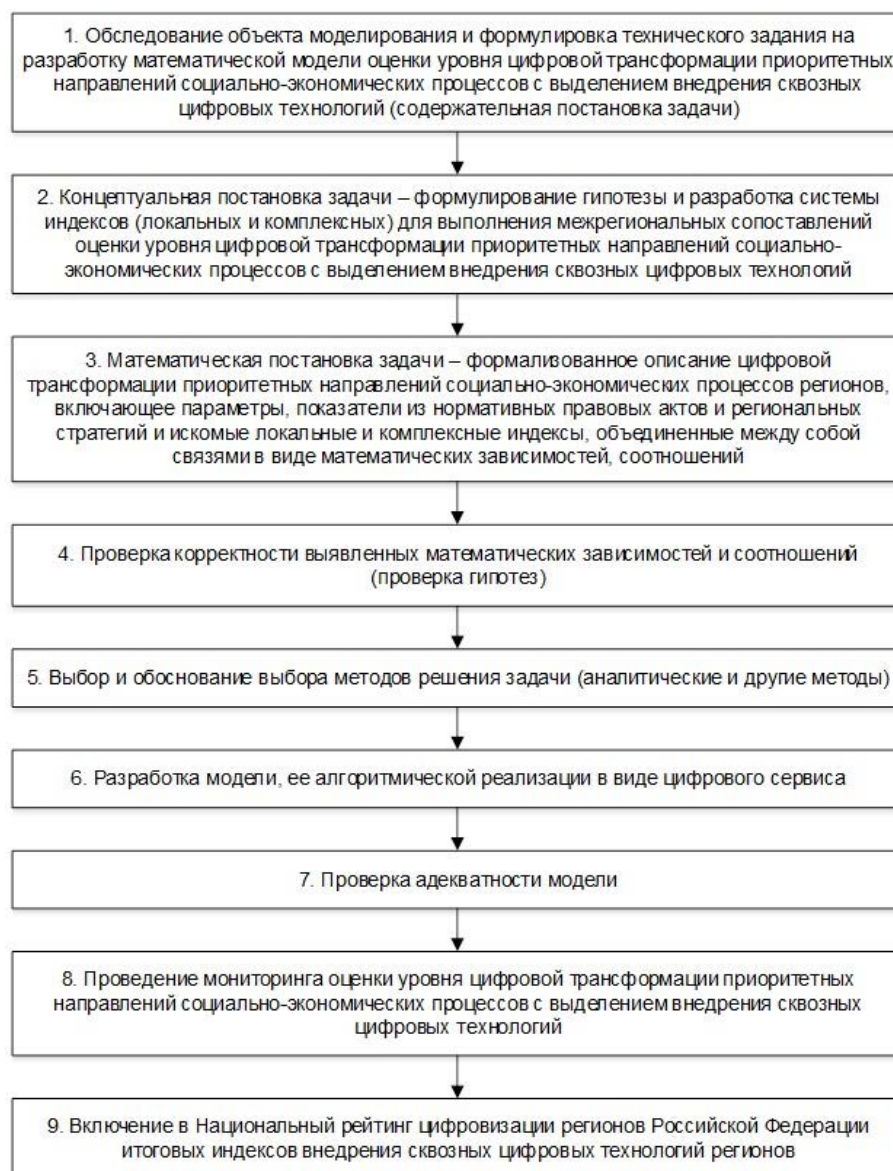


Рис. 1. Этапы построения методики комплексной оценки уровня цифровой трансформации приоритетных направлений социально-экономических процессов

Предлагаемая на рис. 1 методика охватывает концептуальный, математический и программно-технический уровни. Результаты этапов 1, 2 формулируются на языке бизнес-процессов. Этапы 3–5 связаны с математической формализацией системы показателей и индексов, описывающих процессы цифровой трансформации в регионе. Этапы 6–9 имеют технический характер и нацелены на получение конечного программного продукта для поддержки лиц, принимающих решения. В современных экономических условиях такие технические инструменты имеют особую актуальность, поскольку предоставляют возможность комплексной оценки на основе поэлементного исследования уровня цифровой трансформации не только лучших регионов, но и регионов со средними и низкими масштабами деятельности, которые приносят свой вклад в формирование валового регионального продукта (ВРП).

Сопоставление уровней цифровой трансформации регионов по внедрению ЦИТ может осуществляться с применением индексного инструментария для решения следующих задач:

- 1) ранжирования регионов и определения их позиций;
- 2) группировки регионов с распределением на восемь категорий;
- 3) выделения сфер деятельности, показывающих рост или снижение затрат на внедрение и использование ЦИТ.

Основой для разработки системы показателей и локальных индексов методики численной оценки явились нормативные правовые акты [11, 16].

Наиболее значимым инструментарием разработки индексов являются методы детерминированной комплексной оценки. В частности, аддитивная модель применена в методологии расчета индекса «Цифровая Россия» субъектов Российской Федерации [17], в методике оценки уровня цифровизации субнациональных образований [18].

В математической модели важное значение имеют выбор и обоснование показателей, формирующих локальные индексы.

Результаты и обсуждение

На основе приоритетных целей и задач цифровой трансформации социально-экономических процессов субъектов РФ и с учетом базового стандарта «Цифровая зрелость» [11] выделены пять отраслевых направлений мониторинга и разработаны индексы для оценки ее уровня – локальные и комплексные. Для формирования локальных индексов осуществлен отбор показателей, дающих обобщенные численные характеристики внедрения и развития ЦИТ с возможностью применения при цифровом неравенстве анализируемых субъектов РФ.

Наиболее важным численным фактором при оценке уровня цифровой трансформации регионов является комплексный индекс ($KI_{\text{цтр}}$), включающий основные локальные индексы, базирующиеся на системе критериальных показателей и их пороговых значениях.

В табл. 1 представлены локальные индексы-индикаторы комплексной оценки уровня цифровой трансформации субъектов РФ по внедрению ЦИТ в ключевых отраслях экономики и социальной сферы.

Таблица 1

**Локальные индексы-индикаторы комплексной оценки уровня
цифровой трансформации регионов по внедрению СЦТ
в ключевых отраслях экономики и социальной сферы**

Наименование индикатора	Расчет индекса	Характеристика
1	2	3
1. Цифровые технологии (в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве, транспорте и логистике)		
Локальный индекс применения «сквозных» цифровых технологий организациями ($LI_{рсцт}$)	Отношение коэффициента роста затрат на развитие «сквозных» цифровых технологий ($\frac{Z_{всцт \text{ фактические}}}{Z_{всцт \text{ базовые}}}$) к пороговому значению	Отражает достаточность увеличения затрат на внедрение СЦТ организациями, зарегистрированными на территории региона
2. Здравоохранение		
Локальный индекс цифрового развития здравоохранения ($LI_{црзо}$)	Отношение показателя доли объемов оказанной высокотехнологичной медицинской помощи в общем объеме операций ($D_{вмп}$) к пороговому значению	Отражает достаточность объемов оказанной высокотехнологичной медицинской помощи
3. Цифровое государственное управление		
Локальный индекс развития цифрового государственного управления ($LI_{цргу}$)	Отношение показателя доли приоритетных государственных услуг и сервисов, оказываемых органами власти субъекта Российской Федерации и местного самоуправления и организациями государственной собственности субъекта Российской Федерации и муниципальной собственности, соответствующих целевой модели цифровой трансформации ($D_{гусцт}$) к пороговому значению	Показывает достаточность обеспечения предоставления физическим и юридическим лицам приоритетных массовых социально значимых государственных и муниципальных услуг и сервисов в цифровом виде в соответствии с целевым состоянием
4. Развитие городской среды		
Локальный индекс цифрового развития городской среды ($LI_{ргс}$)	Отношение показателя доли объемов оказанных услуг с применением «сквозных» цифровых технологий в общем объеме услуг ($D_{сцт}$) к пороговому значению	Показывает полноту внедрения СЦТ

Окончание табл. 1

1	2	3
5. Образование (общее)		
Локальный индекс внедрения «сквозных» цифровых технологий в организации общего образования ($LI_{\text{всего}}$)	Отношение показателя доли числа организаций, реализующих образовательные программы начального общего, основного общего, среднего общего образования и внедривших «сквозные» цифровые технологии, в общем числе организаций, осуществляющих образовательную деятельность по образовательным программам начального общего, основного общего, среднего общего образования ($D_{\text{оргсцт}}$) к пороговому значению	Отражает процесс цифровой трансформации образовательной системы

Основным практическим преимуществом предлагаемой методики численной оценки уровня цифровой трансформации приоритетных направлений социально-экономических процессов является удобство алгоритмизации и последующих технических решений, обеспечивающих:

- 1) приведение к сопоставимости как исходных данных, так и результирующих показателей при помощи аналитических группировок;
- 2) использование показателей, применяемых в российских нормативных правовых актах и региональных стратегиях, что облегчит процесс сбора исходных данных для анализа;
- 3) расчет минимально необходимого числа индексов, в совокупности релевантных итоговой оценке цифровой трансформации субъектов РФ;
- 4) получение наиболее точных и адекватных результатов на основе определения локальных и комплексного индексов уровня цифровой трансформации регионов по внедрению СЦТ без проведения дополнительных корректировок.

Предлагаемая система индексов включает комплексные и локальные (основные и дополнительные) индексы. Дополнительные локальные индексы служат для детализации данных и учета региональной специфики. Их состав определяется по перечню направлений, определенных в стратегиях цифровой трансформации субъектов РФ [1].

Экспериментальную проверку предлагаемой методики планируется провести в регионах Приволжского федерального округа, в частности Республике Татарстан и Пензенской области. В региональных стратегиях этих субъектов общими являются восемь сфер деятельности – образование и наука, здравоохранение, развитие городской среды, транспорт и логистика, государственное управление, социальная сфера, промышленность, экология и природопользование. В Татарстане стратегия цифровой трансформации охватывает 15 отраслей, кроме вышеназванных, – культура, сельское хозяйство, строительство, молодежная политика, массовые коммуникации и средства массовой информации,

туризм, физическая культура и спорт. В ходе ее реализации будут внедрены системы искусственного интеллекта, платформенные решения, системы на основе больших данных, интернета вещей, цифровых двойников.

Комплексный индекс определяется как интегральная оценка его составляющих – основных локальных индексов.

На первом этапе определены весовые коэффициенты, отражающие структуру оцениваемой системы с различающей значимостью локальных индексов в комплексной оценке, путем их ранжирования (см. табл. 1).

Расчет весовых коэффициентов осуществлен на основе формулы Фишберна [19], которая применяется для линейно ранжированного ряда критериев и имеет следующий вид:

$$k_i = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)},$$

где k_i – коэффициент значимости i -го показателя; i – номер текущего показателя; n – количество показателей.

При этом изменение весовых коэффициентов подчиняется убывающей арифметической прогрессии в строго упорядоченном по важности ранжированном ряду.

Итоговое распределение весовых коэффициентов локальных индексов в разрезе приоритетных направлений мониторинга цифровой трансформации субъектов РФ следующее: $k_1 = 0,33$, $k_2 = 0,27$, $k_3 = 0,20$, $k_4 = 0,13$, $k_5 = 0,07$.

Комплексный индекс вычисляется по следующей формуле:

$$KI_{\text{уитр}} = k_1 LI_{\text{рсцто}} + k_2 LI_{\text{црзо}} + k_3 LI_{\text{цргу}} + k_4 LI_{\text{ргс}} + k_5 LI_{\text{всцтоо}},$$

где $LI_{\text{рсцто}}$, $LI_{\text{црзо}}$, $LI_{\text{цргу}}$, $LI_{\text{ргс}}$, $LI_{\text{всцтоо}}$ – основные локальные индексы по исследуемым пяти направлениям цифровой трансформации; k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 – весовые коэффициенты.

На втором этапе формируется комплексная рейтинговая оценка уровня цифровой трансформации регионов ($KR_{\text{уитр}}$) на основе рейтинговой шкалы, включающей восемь категорий оценки. Распределение регионов по категориям базируется на итоговом значении комплексного индекса.

В комплексном рейтинге формируются две группы регионов:

I группа – с продвинутой цифровой трансформацией, объединяющая категории FI–FIII;

II группа – с неустойчивой цифровой трансформацией, включающая категории FIV–FVIII.

В табл. 2 приведена рейтинговая шкала итоговых уровней цифровой трансформации регионов по внедрению «сквозных» цифровых технологий в ключевых отраслях экономики и социальной сферы.

Вполне очевидно, что для снижения риска реализации национального проекта и региональных программ необходимо проводить ежегодный мониторинг цифровой трансформации регионов по внедрению СЦТ в ключевых отраслях экономики и социальной сферы на основе создаваемой информационной базы в разрезе федеральных округов, субъектов РФ. Для информационно-

технической поддержки такого мониторинга планируется реализация рассмотренной методики в виде программного комплекса с возможностями численного расчета показателей, геоинформационной привязки и представления данных, генерации отчетов для лиц, принимающих решения.

Таблица 2

Рейтинговая шкала итоговых уровней цифровой трансформации регионов по внедрению СЦТ в ключевых отраслях экономики и социальной сферы

Категория, уровни	Интервалы значений индексов	Оценка цифровой трансформации регионов по внедрению СЦТ в ключевых отраслях экономики и социальной сферы
I группа регионов – с продвинутой цифровой трансформацией		
FI	Свыше 0,95	Высокая или отличная
FII	0,88–0,95	Недостаточно высокая
FIII	0,80–0,87	Хорошая
II группа регионов – с неустойчивой цифровой трансформацией		
FIV	0,72–0,79	Не достигающая хорошего уровня
FV	0,60–0,71	Средняя или удовлетворительная
FVI	0,50–0,59	Не достигающая среднего уровня
FVII	0,41–0,49	Низкая
FVIII	0,4 и ниже	Неудовлетворительная

Заключение

Таким образом, для сопоставления уровней цифровой трансформации субъектов РФ приоритетным является индексный метод. Использование индексного метода позволяет определить характеристики изменения уровней локальных и комплексного индексов сложного социально-экономического процесса субъектов РФ. В статье представлены виды и характеристика пяти локальных индексов-индикаторов, дающих в совокупности комплексную оценку уровня цифровой трансформации регионов по основным направлениям в части внедрения «сквозных» цифровых технологий.

На основе индексного подхода разработана методика численной оценки уровня цифровой трансформации социально-экономических процессов регионов с достаточным числом субиндексов или факторов, что является преимуществом по сравнению с другими методиками. По результатам расчетов предложен способ группировки регионов по уровням цифровой трансформации в разрезе федеральных округов на основе восьмиуровневой шкалы.

Ближайшие перспективы развития данной работы будут связаны с алгоритмизацией и программно-технической реализацией предложенной методики с экспериментальной проверкой на реальных данных в масштабе Пензенской области и некоторых других смежных регионов Приволжского федерального округа.

Поскольку в стратегиях регионов утверждены показатели по различному числу сфер деятельности, то некорректно формировать итоговый индекс для сравнения регионов по полному числу анализируемых показателей. В связи с этим разрабатываемый программный продукт будет ориентирован на пространственно-географические и социально-экономические особенности регионов,

а также на использование предложенной системы с учетом региональных индексов по пяти общим направлениям и дополнительных локальных индексов по другим направлениям, определенным в региональных стратегиях цифровой трансформации.

Список литературы

1. Стратегии цифровой трансформации // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/1064/> (дата обращения: 05.09.2022).
2. Мишустин заявил о необходимости перехода к опережающей модели экономики. URL: <https://russian.rt.com/russia/news/1022099-mishustin-model-ekonomika> (дата обращения: 05.09.2022).
3. Методология расчета индекса «Цифровая Россия» субъектов Российской Федерации. URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/00436d13-c75c-46cf-9e78-89375a6b4918/SKOLKOVO_Digital_Russia_Methodology_2019-04_ru.pdf (дата обращения: 05.09.2022).
4. Абдрахманова Г. И., Быховский К. Б., Веселитская Н. Н. [и др.]. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты : доклад к XXII Апрельской междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества (г. Москва, 13–30 апреля 2021 г.). М. : НИУ ВШЭ, 2021. 239 с. URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (дата обращения: 05.09.2022).
5. Козлов А. В., Тесля А. Б., Иващенко А. А. Формирование системы индикаторов для мониторинга процессов цифровизации национальной экономики // Известия высших учебных заведений. Сер.: Экономика, финансы и управление производством. 2021. № 01. С. 97–107. doi: 10.6060/ivecofin.20214701.522
6. Domnina S. V., Podkopaev O. A., Salynina S. U. The Digital Economy: Challenges and Opportunities for Economic Development in Russia's Regions // Current Achievements, Challenges and Digital Chances of Knowledge Based Economy. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 133. P. 149–157. doi: 10.1007/978-3-030-47458-4_18
7. Логачева Н. А. Использование метода графов для изучения взаимосвязи факторов цифрового развития региона // Фундаментальные и прикладные аспекты глобализации экономики : тезисы докладов и выступлений II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Донецк, 2021. С. 319–321.
8. Tolstykh T. O., Shkarupeta E. V., Shishkin I. A. [et al.]. Evaluation of the Digitalization Potential of Region's Economy // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 622. P. 746–753. doi: 10.1007/978-3-319-75383-6_94
9. Великая О. А. Цифровые технологии и инструменты как основа эффективности развития промышленности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 5–15. doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-1
10. Ширинкина Е. В. Оценка факторов и их значимости, влияющих на индекс цифровизации предприятий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 2. С. 99–109. doi: 10.21685/2227-8486-2020-2-7
11. Об утверждении методик расчета целевых показателей национальной цели развития Российской Федерации «Цифровая трансформация» : приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации № 600 от 18.11.2020 : [ред. от 14.01.2021]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/603495316> (дата обращения: 05.09.2022).
12. Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/62117> (дата обращения: 05.09.2022).
13. О системе управления реализацией национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : постановление Правительства Российской Федерации от 14.01.2021 № 102.

- Федерации № 234 от 02.03.2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553834855> (дата обращения: 05.09.2022).
14. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : [утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам № 16 от 24.12.2018]. URL: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNLo6gczMkPF.pdf> (дата обращения: 05.09.2022).
 15. Центр НТИ МГУ разрабатывает Национальный индекс развития цифровой экономики. URL: <https://www.msu.ru/science/news/tsentr-nti-mgu-razrabatyvaet-natsionalnyy-indeks-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki.html> (дата обращения: 05.09.2022).
 16. Об утверждении Разъяснений (методических рекомендаций) по разработке региональных проектов в рамках федеральных проектов национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации № 428 от 01.08.2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542375> (дата обращения: 05.09.2022).
 17. Методология расчета индекса «Цифровая Россия» субъектов Российской Федерации. URL: https://finance.skolkovo.ru/downloads/documents/FinChair/Research_Reports/SKOLKOVO_Digital_Russia_Methodology_2019-04_ru.pdf (дата обращения: 05.09.2022).
 18. Sidorov A., Senchenko P. Regional Digital Economy: Assessment of Development Levels // *Mathematics*. 2020. Vol. 8, № 12. P. 2143. doi: 10.3390/math8122143
 19. Сигал А. В. Использование последовательностей Фишберна для адекватного моделирования по выборочным данным // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15, № 4. С. 50–60. doi: 10.17323/2587-814X.2021.4.50.60

References

1. Strategies of digital transformation. *Ministerstvo tsifrovogo razvitiya, svyazi i massovyykh kommunikatsiy Rossiyskoy Federatsii* = Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation. (In Russ.). Available at: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/1064/> (accessed 05.09.2022).
2. *Mishustin zayavil o neobkhodimosti perekhoda k operezhayushchey modeli ekonomiki* = Mishustin stated the need to switch to a leading model of the economy. (In Russ.). Available at: <https://russian.rt.com/russia/news/1022099-mishustin-model-ekonomika> (accessed 05.09.2022).
3. *Metodologiya rascheta indeksa «Tsifrovaya Rossiya» sub"ektov Rossiyskoy Federatsii* = Methodology for calculating the index "Digital Russia" of the subjects of the Russian Federation. (In Russ.). Available at: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/00436d13-c75c-46cf-9e78-89375a6b4918/SKOLKOVO_Digital_Russia_Methodology_2019-04_ru.pdf (accessed 05.09.2022).
4. Abdrakhmanova G.I., Bykhovskiy K.B., Veselitskaya N.N. et al. *Tsifrovaya transformatsiya otrasley: startovye usloviya i priority: doklad k XXII Aprel'skoy mezhdunar. nauch. konf. po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva (g. Moskva, 13–30 aprelya 2021 g.)* = Digital transformation of industries: starting conditions and priorities : report to the XXII April International Scientific Conference on Problems of Economic and Social Development (Moscow, April 13-30, 2021). Moscow: NIU VShE, 2021:239. (In Russ.). Available at: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (accessed 05.09.2022).
5. Kozlov A.V., Teslya A.B., Ivashchenko A.A. Formation of a system of indicators for monitoring the processes of digitalization of the national economy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser.: Ekonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom* = *Izvestia of higher educational institutions. Ser.: Economics, finance and production management*. 2021;(01):97–107. (In Russ.). doi: 10.6060/ivecofin.20214701.522

6. Domnina S.V., Podkopaev O.A., Salynina S.U. The Digital Economy: Challenges and Opportunities for Economic Development in Russia's Regions. *Current Achievements, Challenges and Digital Chances of Knowledge Based Economy. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;133:149–157. doi: 10.1007/978-3-030-47458-4_18
7. Logacheva N.A. Using the graph method to study the interrelation of factors of digital development of the region. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty globalizatsii ekonomiki: tezisy dokladov i vystupleniy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh = Fundamental and applied aspects of economic globalization : abstracts of reports and speeches of the II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. Donetsk, 2021:319–321. (In Russ.)
8. Tolstykh T.O., Shkarupeta E.V., Shishkin I.A. et al. Evaluation of the Digitalization Potential of Region's Economy. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018;622:746–753. doi: 10.1007/978-3-319-75383-6_94
9. Velikaya O.A. Digital technologies and tools as a basis for the efficiency of industrial development. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-1
10. Shirinkina E.V. Assessment of factors and their significance affecting the index of digitalization of enterprises. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(2):99–109. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2020-2-7
11. *Ob utverzhdenii metodik rascheta tselevykh pokazateley natsional'noy tseli razvitiya Rossiyskoy Federatsii «Tsifrovaya transformatsiya»: prikaz Ministerstva tsifrovogo razvitiya, svyazi i massovykh kommunikatsiy Rossiyskoy Federatsii № 600 ot 18.11.2020: [red. ot 14.01.2021] = On approval of the methods for calculating the target indicators of the national development goal of the Russian Federation "Digital Transformation" : Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation No. 600 dated 18.11.2020: [ed. from 14.01.2021].* (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/603495316> (accessed 05.09.2022).
12. *Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya Sistema = Unified interdepartmental information and statistical system.* (In Russ.). Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/62117> (accessed 05.09.2022).
13. *O sisteme upravleniya realizatsiey natsional'noy programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii»: postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 234 ot 02.03.2019 = On the management system for the implementation of the national program "Digital Economy of the Russian Federation" : Decree of the Government of the Russian Federation No. 234 of 02.03.2019.* (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/553834855> (accessed 05.09.2022).
14. *Pasport natsional'noy programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii»: [utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nym proektam № 16 ot 24.12.2018] = Passport of the national program "Digital Economy of the Russian Federation": [approved by the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National projects No. 16 dated 12/24/2018].* (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNLo6gczMkPF.pdf> (accessed 05.09.2022).
15. *Tsentr NTI MGU razrabatyvaet Natsional'nyy indeks razvitiya tsifrovoy ekonomiki = The NTI Center of Moscow State University is developing a National Index for the Development of the Digital Economy.* (In Russ.). Available at: <https://www.msu.ru/science/news/tsentr-nti-mgu-razrabatyvaet-natsionalnyy-indeks-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki.html> (accessed 05.09.2022).
16. *Ob utverzhdenii Raz'yasneniy (metodicheskikh rekomendatsiy) po razrabotke regional'nykh proektov v ramkakh federal'nykh proektov natsional'noy programmy*

«Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii»: prikaz Ministerstva tsifrovogo razvitiya, svyazi i massovykh kommunikatsiy Rossiyskoy Federatsii № 428 ot 01.08.2018 = On approval of Explanations (methodological recommendations) on the development of regional projects within the framework of federal projects of the national program "Digital Economy of the Russian Federation" : Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation No. 428 dated 01.08.2018. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/564542375> (accessed 05.09.2022).

17. Metodologiya rascheta indeksa «Tsifrovaya Rossiya» sub"ektov Rossiyskoy Federatsii = Methodology for calculating the index "Digital Russia" of the subjects of the Russian Federation. (In Russ.). Available at: https://finance.skolkovo.ru/downloads/documents/FinChair/Research_Reports/SKOLKOVO_Digital_Russia_Methodology_2019-04_ru.pdf (accessed 05.09.2022).
18. Sidorov A., Senchenko P. Regional Digital Economy: Assessment of Development Levels. *Mathematics*. 2020;8(12):2143. doi: 10.3390/math8122143
19. Sigal A.V. The use of Fishburn sequences for adequate modeling based on sample data. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2021;15(4):50–60. (In Russ.). doi: 10.17323/2587-814X.2021.4.50.60

Информация об авторах / Information about the authors

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)

Влада Владиславовна Свиридова

инженер-программист,
ООО «БИ Телеком»
(Россия, г. Москва,
2-й Южнопортовый проезд, 18);
аспирант кафедры систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vladachess@mail.ru

Vlada V. Sviridova

Software engineer,
LLC BI Telecom
(18 2nd Yuzhnoportovy passage,
Moscow, Russia);
postgraduate student 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 10.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 30.04.2023

Принята к публикации/Accepted 12.05.2023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ EFFICIENTDET В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПАТОЛОГИЙ ЖЕЛУДКА НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В. В. Хрящев¹, А. Л. Приоров²

^{1, 2} Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова, Ярославль, Россия
¹v.khryashchev@uniyar.ac.ru, ²andcat@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Получение максимально достоверной информации при выполнении эндоскопических исследований желудочно-кишечного тракта дает возможность на ранних стадиях обнаруживать и классифицировать опасные патологии, включая онкологические. Это значительно снижает летальность среди больных с данными видами заболеваний. Рассматривается задача обнаружения патологий желудка на видеоданных эндоскопических исследований. *Материалы и методы.* Проведен анализ эффективности использования достаточно новой архитектуры сверточной нейронной сети EfficientDet для обнаружения опасных патологий желудка на видеоизображениях эндоскопических исследований. Для обучения и тестирования алгоритмов глубокого машинного обучения использовались 54 видеозаписи исследований желудка, проведенных в эндоскопическом отделении Ярославской областной клинической онкологической больницы. *Результаты.* Проанализированы результаты работы разработанного алгоритма в сравнении с популярным подходом на основе архитектуры сверточной нейронной сети SSD300. Получены зависимости значений функций потерь подсети классификации и подсети регрессии, вычисленных на обучающей выборке, а также значений стандартных метрик F1, mAP, Precision и Recall. Показано достижение существенного превосходства по метрике средней точности при сохранении хороших показателей по критериям робастности и скорости обработки видеокадра. *Выводы.* Разработанный алгоритм может быть использован в качестве основного при реализации нейросетевого модуля детектирования патологий на эндоскопических изображениях желудка.

Ключевые слова: эндоскопические видеоданные, машинное обучение, сверточная нейронная сеть, обнаружение объектов, патологии желудка, метрики качества

Для цитирования: Хрящев В. В., Приоров А. Л. Использование нейронной сети EfficientDet в задаче обнаружения патологий желудка на видеоизображениях эндоскопического исследования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 185–192. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-12

THE USE OF THE EFFICIENTDET NEURAL NETWORK IN THE TASK OF DETECTING STOMACH PATHOLOGIES ON VIDEO IMAGES OF ENDOSCOPIC EXAMINATION

V.V. Khryashchev¹, A.L. Priorov²

^{1, 2} P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
¹v.khryashchev@uniyar.ac.ru, ²andcat@yandex.ru

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

Abstract. *Background.* Obtaining the most reliable information when performing endoscopic examinations of the gastrointestinal tract makes it possible to detect and classify dangerous pathologies, including oncological ones, at an early stage. This significantly reduces mortality among patients with these types of diseases. The problem of detecting stomach pathologies on the video data of endoscopic studies is considered. *Materials and methods.* The analysis of the effectiveness of using a fairly new architecture of the EfficientDet convolutional neural network for detecting dangerous stomach pathologies on video images of endoscopic examinations is carried out. 54 videos of stomach studies conducted in the endoscopic department of the Yaroslavl Regional Clinical Oncology Hospital were used to train and test deep machine learning algorithms. *Results.* The results of the developed algorithm are analyzed in comparison with the popular approach based on the architecture of the convolutional neural network SSD300. The dependences of the values of the loss functions of the classification subnet and the regression subnet calculated on the training sample, as well as the values of the standard metrics F1, mAP, Precision and Recall are obtained. The achievement of a significant superiority in the metric of average accuracy is shown while maintaining good indicators according to the criteria of robustness and processing speed of the video frame. *Conclusions.* The developed algorithm can be used as the main one in the implementation of a neural network module for detecting pathologies on endoscopic images of the stomach.

Keywords: endoscopic video data, machine learning, convolutional neural network, object detection, stomach pathology, quality metrics

For citation: Khryashchev V.V., Priorov A.L. The use of the EfficientDet neural network in the task of detecting stomach pathologies on video images of endoscopic examination. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):185–192. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-12

Введение

В настоящее время актуальной задачей является получение максимально достоверной информации при выполнении эндоскопических исследований желудочно-кишечного тракта [1–3]. Это дает возможность на ранних стадиях обнаруживать и классифицировать опасные патологии, включая онкологические, что значительно снижает летальность среди больных с данными видами заболеваний. Конкретно в данной работе основное внимание уделено эндоскопическому исследованию желудка.

Для обучения и тестирования алгоритмов глубокого машинного обучения использовались 54 видеозаписи исследований желудка, проведенных в эндоскопическом отделении Ярославской областной клинической онкологической больницы. Процедура экспертной разметки видеозаписей включала в себя подбор кадров с патологией (всего 2971 кадр) и локализацию ее в виде указания соответствующих координат обрамляющей прямоугольной рамки. Таким способом выделены следующие классы: ранний рак (902 кадра), рак (297 кадров), иная патология (1772 кадра). Более подробно используемая база изображений описана в предыдущих работах авторов [4, 5].

Целью работы является анализ эффективности использования относительно новой архитектуры сверточной нейронной сети EfficientDet для обнаружения опасных патологий желудка на видеоизображениях эндоскопических исследований.

Материалы и методы

В настоящее время эндоскопия фактически выделилась в отдельное медицинское направление. Уже традиционно для обработки эндоскопических видеоизображений используются методы глубокого машинного обучения, в частности сверточные нейронные сети (СНС) [6, 7]. Технологии СНС достаточно быстро развиваются и совершенствуются. Например, относительно недавно предложено новое семейство нейросетевых детекторов EfficientDet [8] с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Это сделано в результате изучения различных вариантов проектирования современных нейронных сетей для эффективного обнаружения так называемых «объектов интереса». В случае гастроскопии ими могут являться различные патологии пищевода и желудка, а также двенадцатиперстной кишки.

Нейросетевые детекторы, построенные на основе архитектуры EfficientDet, могут достигать большей точности и эффективности в задачах анализа изображений, чем их существующие аналоги. Важно отметить, что они делают это в условиях широкого спектра ограничений по различным ресурсам, в том числе и вычислительным. Архитектура типовой СНС данного типа приведена на рис. 1. Она соответствует парадигме одноступенчатых детекторов (Single Shot Detector). В качестве базовой части используется сеть EfficientNetB0, веса которой настраиваются на стандартной базе изображений ImageNet [9]. К ней добавляется специальным образом формируемый слой признаков BiFPN (bi-directional feature pyramid network).



Рис. 1. Архитектура сверточной нейронной сети EfficientDet

Далее к нему присоединяются подсети детектирования положения рамки и прогнозирования класса. Следует заметить, что особенностью архитектуры EfficientDet является использование функции активации SoftMax [10]. Таким образом, СНС семейства EfficientDet строятся с использованием идеи одновременного масштабирования базовой части, пирамиды признаков и подсетей детектирования и классификации.

Результаты и обсуждение

В проведенном исследовании архитектура EfficientDet использована в качестве основного способа обнаружения и классификации патологий. Динамика изменения функций потерь (подсети классификации, подсети регрессии), вычисленных на обучающей выборке, а также значений метрик F1, mAP, Precision, Recall для валидационной выборки, во время обучения нейросетевого алгоритма, приведены на рис. 2. Из приведенных кривых видно, что значения стандартных метрик качества для разработанного нейросетевого алгоритма достаточно высокие и во всех случаях стремятся к единице.

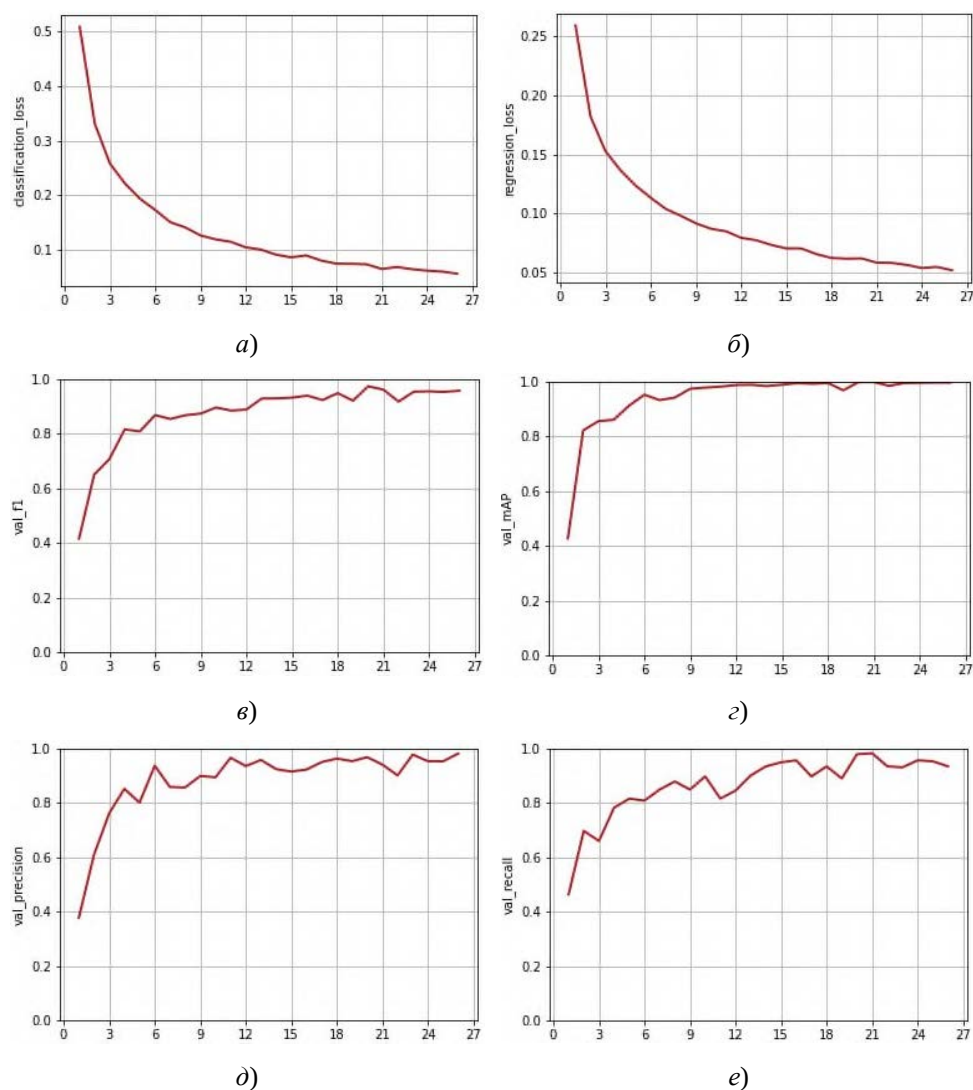


Рис. 2. Зависимость значений стандартных метрик от числа эпох при обучении алгоритма на основе сети EfficientDet, вычисленные на обучающей выборке (а, б) и на валидационной выборке (в–е): а – функция потерь подсети классификации; б – функция потерь подсети регрессии; в – метрика F1; г – метрика mAP; д – метрика Precision; е – метрика Recall

Наибольшие значения метрик, полученные среди всех эпох обучения, для разработанного алгоритма приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наилучшие значения метрик для алгоритма
на основе архитектуры EfficientDet

Сеть/ параметры	classification loss	regression_ loss	val_F1	val_ mAP	val_ precision	val_ recall	last_ epoch
EfficientDet + EfficientNetB0	0,13	0,09	0,87	0,97	0,9	0,85	24

Для сравнения работы нейросетевых алгоритмов детектирования патологий желудка использовались четыре варианта алгоритмов обнаружения, построенных на базе нейросетевой архитектуры SSD300 [11]. В табл. 2 приведены значения средней метрики точности (AP), вычисленной для трех классов, имеющих в размеченном наборе изображений, при использовании нейронных сетей SSD и EfficientDet с наилучшими параметрами запуска.

Таблица 2

Сравнение сети EfficientDet с алгоритмами на базе архитектуры SSD300

Сеть	AP («рак»)	AP («ранний рак»)	AP («иная патология»)
SSD300 + VGG19	0,81	0,87	0,28
SSD300 + MobileNetV2	0,63	0,63	0,28
SSD300 + Xception	0,7	0,81	0,45
SSD300 + VGG16	0,71	0,9	0,41
EfficientDet + EfficientNetB0	0,99	0,99	0,94

Видно, что лучшие результаты по метрике точности показала нейронная сеть EfficientDet. Для вариантов ранее широко распространенной нейросетевой архитектуры SSD результаты по точности значительно ниже, особенно для класса «иная патология».

Важным моментом для практической работы всех нейросетевых алгоритмов, включая и алгоритмы детектирования патологий, является обеспечение их устойчивости к различным негативным факторам (робастности). Для тестирования по этому критерию использовался следующий подход. Нейросетевые модели обучались только на изображениях с эндоскопа OLYMPUS EXERA III GIF-HQ190, а тестирование проводилось только на выборке изображений с более ранних моделей эндоскопов OLYMPUS 160, 170 и 180 серий. Результаты такого эксперимента приведены в табл. 3. В ячейках таблицы отражены результаты метрики AP и уровень этих показателей относительно результатов (показатель деградации алгоритма), приведенных в табл. 2. Приведен средний показатель деградации алгоритма для трех указанных классов.

Таблица 3

Сравнение робастности алгоритмов при обучении и тестировании на разных поколениях эндоскопического оборудования

Сеть	AP («рак»)	AP («ранний рак»)	AP («иная патология»)	Средний показатель деградации
SSD300 + VGG19	0,72 89,7 %	0,79 90,0 %	0,24 84,2 %	88,0 %
SSD300 + MobileNetV2	0,56 89,6 %	0,57 91,4 %	0,24 85,4 %	88,8 %
SSD300 + Xception	0,63 89,2 %	0,73 90,4 %	0,36 81,1 %	86,9 %
SSD300 + VGG16	0,64 91,1 %	0,82 92,0 %	0,35 85,8 %	89,6 %
EfficientDet + EfficientNetB0	0,87 88,2 %	0,86 87,0 %	0,82 86,7 %	87,3 %

Приведенные результаты показывают, что рассчитанный показатель робастности для разных моделей нейронных сетей находится в диапазоне 86,9–89,6 %. Некоторое преимущество по этому показателю показывает архитектура SSD300 + VGG16, опережая рассматриваемую сеть EfficientDet в среднем на 2,3 % для трех классов. Однако абсолютные значения метрики AP для нейронной сети EfficientDet остаются наилучшими для такого «стресс-теста», хотя и показывают несколько более высокий уровень деградации результатов для классов «рак» и «ранний рак».

Время обработки одного кадра эндоскопической видеопоследовательности является еще одним важным практическим параметром работы нейросетевого алгоритма детектирования патологий желудка на соответствующих эндоскопических изображениях.

Для подсчета времени обработки одного кадра реализован программный эксперимент по тестированию алгоритмов на так называемых батчах – наборах обучающих выборок из входных данных. Для рассматриваемых нейросетевых алгоритмов рассчитано общее время тестирования, затраченное на обработку батчей за 22 итерации. Вычислено среднее время обработки одного видеокadra (отношение времени тестирования к произведению числа изображений в одном батче и числа итераций). Результаты указанного программного эксперимента приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение результатов работы исследуемых нейросетевых алгоритмов детектирования патологий желудка по скорости обработки одного кадра

Сверточная нейронная сеть	Общее время тестирования (число итераций за 1 с)	Среднее время обработки одного кадра, с
SSD300 + VGG19	13,49 с (1,61 итер/с)	0,04 с
SSD300 + MobileNetV2	13,73 с (1,62 итер/с)	0,04 с
SSD300 + Xception	12,64 с (1,74 итер/с)	0,04 с
SSD300 + VGG16	13,57 с (1,6 итер/с)	0,04 с
EfficientDet + EfficientNetB0	17,72 с (1,24 итер/с)	0,05 с

Учитывая приведенные значения, можно сделать вывод о том, что наилучшим подходом по скорости работы среди перечисленных моделей нейросетей можно считать модель SSD с базовой сетью Xception. Следует отметить, что значения, приведенные в табл. 4, с практической точки зрения различаются между собой незначительно. Хотя некоторое отставание в процессе обработки кадра (число итераций в секунду) алгоритмом на основе архитектуры EfficientDet составляет порядка 28,8 %, но это не является критичным, что подтверждается расчетом среднего времени обработки кадра.

Заключение

Рассматривается детектирование (обнаружение) патологий желудка на видеоизображениях эндоскопических исследований. Описан детектор на основе относительно новой архитектуры сверточной нейронной сети EfficientDet. Получены зависимости значений функций потерь подсети

классификации и подсети регрессии, вычисленных на обучающей выборке, а также значений стандартных метрик F1, mAP, Precision и Recall.

Проанализированы результаты работы нейросетевого алгоритма в сравнении с популярным подходом на основе архитектуры SSD300. Показано достижение существенного превосходства по метрике средней точности при сохранении хороших показателей по критериям робастности и скорости обработки видеокadra.

Рассмотренный алгоритм будет использоваться в качестве основного при реализации нейросетевого модуля детектирования патологий на эндоскопических изображениях желудка.

Список литературы

1. Палевская С. А., Короткевич А. Г. Эндоскопия желудочно-кишечного тракта. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2020. 752 с.
2. Куваев Р. О., Кашин С. В. Современное эндоскопическое исследование желудка с использованием методик узкоспектральной и увеличительной эндоскопии: техника проведения и алгоритмы диагностики // Доказательная гастроэнтерология. 2016. Т. 2, № 5. С. 3–13.
3. Батухтин Д. М., Пеганова Е. В., Митракова Н. Н. Анализ узкоспектральных эндоскопических изображений на внутренней поверхности пищевода // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 4. С. 45–57.
4. Хрящев В. В., Ганин А. Н., Лебедев А. А. [и др.]. Разработка и анализ алгоритма детектирования патологий на эндоскопических изображениях желудка на основе сверточной нейронной сети // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 70–75.
5. Лебедев А. А., Хрящев В. В., Кашин С. В. [и др.]. Применение методов глубокого обучения для поддержки врачебного решения при эндоскопическом исследовании желудка // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 2. С. 95–106.
6. Itoh T., Kawahira H., Nakashima H. Deep learning analyzes Helicobacter pylori infection by upper gastrointestinal endoscopy images // Endoscopy International Open. 2018. Vol. 6, № 2. P. 139–144.
7. Zhu Y., Wang Q., Xu M. Application of convolutional neural network in the diagnosis of the invasion depth of gastric cancer based on conventional endoscopy // Gastrointest Endoscopy. 2019. Vol. 89, № 4. P. 806–815.
8. Tan M., Pang R., Le Q. V. EfficientDet: scalable and efficient object detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020. P. 10781–10790.
9. The ImageNet Database. URL: <http://www.image-net.org> (дата обращения: 10.06.2023).
10. Николенко С. И., Кадури А. А., Архангельская Е. О. Глубокое обучение. СПб. : Питер, 2018. 480 с.
11. Хрящев В. В., Среднякова А. С., Ганин А. Н., Кашин С. В. Использование глубоких нейронных сетей для поиска патологий на эндоскопических изображениях желудка // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2021) : докл. 23-й междунар. конф. М., 2021. С. 254–258.

References

1. Palevskaya S.A., Korotkevich A.G. *Endoskopiya zheludochno-kishechnogo trakta = Endoscopy of the gastrointestinal tract*. Moscow: GEOTAR-Media, 2020:752. (In Russ.)
2. Kuvaev R.O., Kashin S.V. Modern endoscopic examination of the stomach using techniques of narrow-spectrum and magnifying endoscopy: technique and algorithms of diagnosis. *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based gastroenterology*. 2016;2(5):3–13. (In Russ.)

3. Batukhtin D.M., Peganova E.V., Mitrakova N.N. Analysis of narrow-spectral endoscopic images on the inner surface of the esophagus. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radio engineering and infocommunication systems*. 2014;(4):45–57. (In Russ.)
4. Khryashchev V.V., Ganin A.N., Lebedev A.A. et al. Development and analysis of an algorithm for detecting pathologies on endoscopic images of the stomach based on convolutional neural network. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2018;(3):70–75. (In Russ.)
5. Lebedev A.A., Khryashchev V.V., Kashin S.V. et al. Application of deep learning methods to support medical decisions during endoscopic examination of the stomach. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(2):95–106. (In Russ.)
6. Itoh T., Kawahira H., Nakashima H. Deep learning analyzes Helicobacter pylori infection by upper gastrointestinal endoscopy images. *Endoscopy International Open*. 2018;6(2):139–144.
7. Zhu Y., Wang Q., Xu M. Application of convolutional neural network in the diagnosis of the invasion depth of gastric cancer based on conventional endoscopy. *Gastrointest Endoscopy*. 2019;89(4):806–815.
8. Tan M., Pang R., Le Q. V. EfficientDet: scalable and efficient object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2020:10781–10790.
9. *The ImageNet Database*. Available at: <http://www.image-net.org> (accessed 10.06.2023).
10. Nikolenko S.I., Kadurin A.A., Arkhangel'skaya E.O. *Glubokoe obuchenie = Deep learning*. Saint Petersburg: Piter, 2018:480. (In Russ.)
11. Khryashchev V.V., Srednyakova A.S., Ganin A.N., Kashin S.V. Using deep neural networks to search for pathologies on endoscopic images of the stomach. *Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye (DSPA-2021): dokl. 23-y mezhdunar. konf. = Digital signal processing and its application (DSPA-2021) : reports of the 23rd International conference*. Moscow, 2021:254–258. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

Андрей Леонидович Приоров
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры цифровых
технологий и машинного обучения,
Ярославский государственный
университет имени П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14)
E-mail: andcat@yandex.ru

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

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

Поступила в редакцию/Received 15.04.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.05.2023

Принята к публикации/Accepted 07.06.2023

РЕАЛИЗАЦИЯ АНСАМБЛЕВОГО МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ

О. Ю. Кузнецова¹, Р. Н. Кузнецов², А. В. Кузьмин³

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

¹ ellekasandra@yandex.ru, ² nahab007@rambler.ru, ³ a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе поднимается проблема прогнозирования послеоперационных осложнений. Осложнения после операций могут привести к ухудшению состояния пациента, увеличению затрат на лечение и даже смертельному исходу. В связи с этим наличие возможности предсказывать возможные осложнения после операции помогает в принятии решений о выборе лучшего лечебного подхода и предоставлении более эффективной послеоперационной заботы. *Материалы и методы.* Для прогнозирования осложнений после операции были исследованы модели машинного обучения, включающие логистическую регрессию, метод дерева решений, метод случайного леса, метод k -ближайших соседей, метод опорных векторов, многослойный персептрон с предварительно подобранной архитектурой и метод ансамбля средневзвешенного голосования. *Результаты.* Была проведена предобработка обезличенных данных пациентов, отобраны информативные показатели и обучена ансамблевая модель машинного обучения, основанная на методе случайного леса, методе опорных векторов, многослойном персептроне с предварительно подобранной архитектурой. *Выводы.* В результате работы ансамблевого метода (средневзвешенного голосования – жесткого голосования) точность увеличилась до 78,8 %.

Ключевые слова: машинное обучение, прогнозирование, послеоперационные осложнения, случайный лес

Для цитирования: Кузнецова О. Ю., Кузнецов Р. Н., Кузьмин А. В. Реализация ансамблевого метода машинного обучения для прогнозирования послеоперационных осложнений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 193–202. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-13

IMPLEMENTATION OF ENSEMBLE MACHINE LEARNING MODEL FOR POSTOPERATION COMPLICATIONS PREDICTION

O.Yu. Kuznetsova¹, R.N. Kuznetsov², A.V. Kuzmin³

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

¹ ellekasandra@yandex.ru, ² nahab007@rambler.ru, ³ a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The paper raises the problem of predicting postoperative complications. Complications after surgery can lead to deterioration of the patient's condition, increased treatment costs and even death. Therefore, being able to predict possible complications after surgery helps in making decisions about choosing the best treatment approach and providing more effective postoperative care. *Materials and methods.* To predict complications after

surgery, machine learning models were studied, including logistic regression, the decision tree method, the random forest method, the k-nearest neighbor method, the support vector method, a multilayer perceptron with a pre-selected architecture and the weighted average voting ensemble method. *Results.* Preprocessing of depersonalized data on patients, informative indicators were selected and an ensemble machine learning model based on the random forest method, the support vector method, a multilayer perceptron with a pre-selected architecture was trained. *Conclusions.* As a result of the ensemble method (weighted average voting – hard voting), the accuracy increased to 78,8 %.

Keywords: machine learning, forecasting, postoperative complications, random forest

For citation: Kuznetsova O.Yu., Kuznetsov R.N., Kuzmin A.V. Implementation of ensemble machine learning model for postoperation complications prediction. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):193–202. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-13

Введение

Здравоохранение – это отрасль, в которой в последние годы активно используются методы машинного обучения и искусственного интеллекта. Особенно актуально применение этих методов для решения задач диагностики и прогнозирования. Диагностирование включает в себя определение мер, направленных на исправление работы всех компонентов системы и методов их выполнения. В силу того, что это процесс исследования, ему автоматически предъявляются основные требования в исследовательской деятельности, такие как: использование достоверных источников первичных данных; объективность, определяемая процедурами оценки и составления программы исследования объекта; достижение необходимой точности, приемлемой для практического использования.

Диагнозы, основанные на результатах использования модели машинного обучения и искусственного интеллекта, быстро внедряются во всем спектре здравоохранения. Основными причинами являются уровни точности, обеспечиваемые методами машинного обучения и искусственного интеллекта, а также способность извлекать знания из ретроспективных данных, накопленных медицинскими учреждениями.

Методы прогнозирования осложнений после операции включают в себя широкий спектр технологий и подходов, в том числе клинические, иммунологические, молекулярные и генетические маркеры.

Клинические методы включают в себя оценку риска на основе факторов, таких как возраст, наличие хронических заболеваний, наличие инфекционных заболеваний, состояние пациента перед операцией [1]. Различные шкалы и инструменты используются для оценки риска осложнений: шкалы Американского общества анестезиологии (ASA) и классификации Помери (POSSUM) [2].

Иммунологические методы основаны на оценке функции иммунной системы. Например, прогностические маркеры, такие как общее количество лимфоцитов, отношение Т-клеток к Б-клеткам, отношение CD4 / CD8-клеток и уровень цитокинов, могут быть использованы для прогнозирования риска осложнений после операции [3].

Молекулярные маркеры включают в себя генетические варианты, связанные с болезнями и наследственными факторами. Например, полиморфизм в гене TNF- α может привести к повышению риска осложнений после операции [4].

Генетические маркеры могут быть использованы для оценки генетических факторов, связанных с болезнями и наследственными предрасположенностями. Например, генетические маркеры, связанные с нарушением метаболизма лекарств, могут использоваться для прогнозирования риска развития осложнений, связанных с анестезией [5]. Однако для их применения требуется квалифицированный медицинский персонал и современное оборудование для диагностики.

Формальные методы медицинской диагностики являются эффективным средством для решения сложных проблем диагностики, позволяющих принимать обоснованные решения на основе точных вычислений. В работе [6] проводится сравнительное исследование алгоритмов машинного обучения при прогнозировании тяжелых осложнений после бариатрической хирургии. Большинство алгоритмов показали высокую точность ($>90\%$) и специфичность ($>90\%$) как в обучающих, так и в тестовых данных. Однако ни один из алгоритмов не достиг приемлемой чувствительности в тестовых данных. Было выявлено, что в прогнозировании тяжелых послеоперационных осложнений у пациентов с бариатрической хирургией алгоритмы ансамбля превосходят базовые алгоритмы.

В статье [7] использовался модифицированный метод классификации Помери (P)-POSSUM для прогнозирования послеоперационных осложнений. В течение периода было проведено проспективное обследование 1077 последовательных пациентов. Данные, необходимые для расчета (P)-POSSUM, были доступны для всех пациентов. Операция была выполнена планово у 827 пациентов и в экстренном порядке у 250. Общие показатели заболеваемости и смертности составили 29,5 и 3,4 % соответственно. Интуиция хирурга была лучшим предиктором частоты послеоперационных осложнений, чем POSSUM (32,1 % против 46,4 %). Хирурги переоценили частоту послеоперационных осложнений при плановой хирургии, но недооценили послеоперационную заболеваемость в экстренных случаях, тогда как (P)-POSSUM переоценил заболеваемость и смертность в обоих случаях.

В работе [8] использовалась модель машинного обучения, основанная на методе случайного леса (Random forest), на платформе MySurgeryRisk сделали прогнозы послеоперационных осложнений и смертности, возникших при поступлении в больницу, используя данные электронной медицинской карты и характеристики окружения пациента. Для каждого результата одна модель обучалась как на предоперационных, так и на интраоперационных данных. Точность составила 88 %.

Работа [9] описывает прогностические модели, основанные на методе Градиентного бустинга (GBM), имеют лучшее распознавание, чем другие модели; это указывает на сравнительно лучшую общую производительность. Баллы Брайера для моделей GBM, предсказывающих исследуемые исходы, варьировались в пределах 0,09–0,14, AUCs – в пределах 79–87 %, а F1-баллы – в пределах 41–73 %.

Из приведенных примеров можно сделать вывод, что для прогнозирования осложнений могут успешно применяться модели регрессии, метод случайного леса и нейронные сети, но каждый из них дает недостаточную точность прогноза. В связи с этим было принято решение исследовать методы ансамбля.

Методы ансамбля – это алгоритмы обучения, которые создают набор классификаторов, а затем классифицируют новые точки данных путем (взвешенного) голосования за их предсказания [10]. Теоретически и эмпирически доказано, что

множественные, ансамблевые модели обучения обеспечивают значительно лучшую производительность, чем одиночные слабые учащиеся, особенно при решении многомерных, сложных задач регрессии и классификации.

Целью работы является исследование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования осложнений после операции на примере желчнокаменной болезни, а также объединений их в ансамбли.

Материалы и методы

В работе анализировались обезличенные данные оперированных пациентов с желчнокаменной болезнью. Выборка состоит из 109 пациентов, из них 63 без осложнений и 46 с осложнениями. Для каждого пациента зафиксированы уровни:

- гемоглобина (Hemoglobin);
- эритроцитов (Erythrocytes);
- цветового индекса (Color_index);
- лейкоцитов (Leukocytes);
- нейтрофилов (Neutrophils);
- нейтрофилов сегментоядерных (Neutrophils_segmented);
- лимфоцитов (Lymphocytes);
- моноцитов (Monocytes);
- скорость оседания эритроцитов (ESR);
- общего билирубина (Total_bilirubin);
- общего белка (Total_protein);
- амилазы (Amylase);
- глюкозы (Glucose);
- продолжительность операции (Duration);
- пол пациента (Sex).

Приложение машинного обучения было разработано в три этапа.

Первый этап включает серию шагов:

- по очистке данных и предварительной обработке;
- извлечению важных показателей из входных данных;
- обучению модели машинного обучения на известных данных.

Семь различных моделей классификации были использованы в данной работе для прогнозирования послеоперационных осложнений. Эти модели включают логистическую регрессию, метод дерева решений, метод случайного леса, метод k -ближайших соседей, метод опорных векторов, многослойный персептрон с предварительно подобранной архитектурой и метод ансамбля средневзвешенного голосования. В ансамбль входят модели, получившие наибольшую точность.

Оценщик классификатора голосования, построенный путем объединения различных моделей классификации, оказывается более сильным метаклассификатором, который уравнивает слабые стороны отдельных классификаторов в конкретном наборе данных. Классификатор голосования принимает большинство голосов на основе весов, применяемых к классу или вероятностям классов, и присваивает записи метку класса на основе большинства голосов. Прогноз ансамбля классификаторов может быть математически представлен следующим образом [12]:

$$\hat{y} = \arg \max_i \sum_{j=1}^m \omega_j \chi_A(C_j(x) = i),$$

где C_j – представляет классификатор; ω_j представляет вес, связанный с предсказанием классификатора.

Результаты

Для определения метода заполнения пропущенных данных было необходимо определить тип распределения в выборке, используя гистограмму и коэффициенты эксцесса и асимметрии. При сравнении значений в выборке с нормальным распределением на рис. 1 было обнаружено, что в 14 случаях данные не соответствуют нормальному распределению.

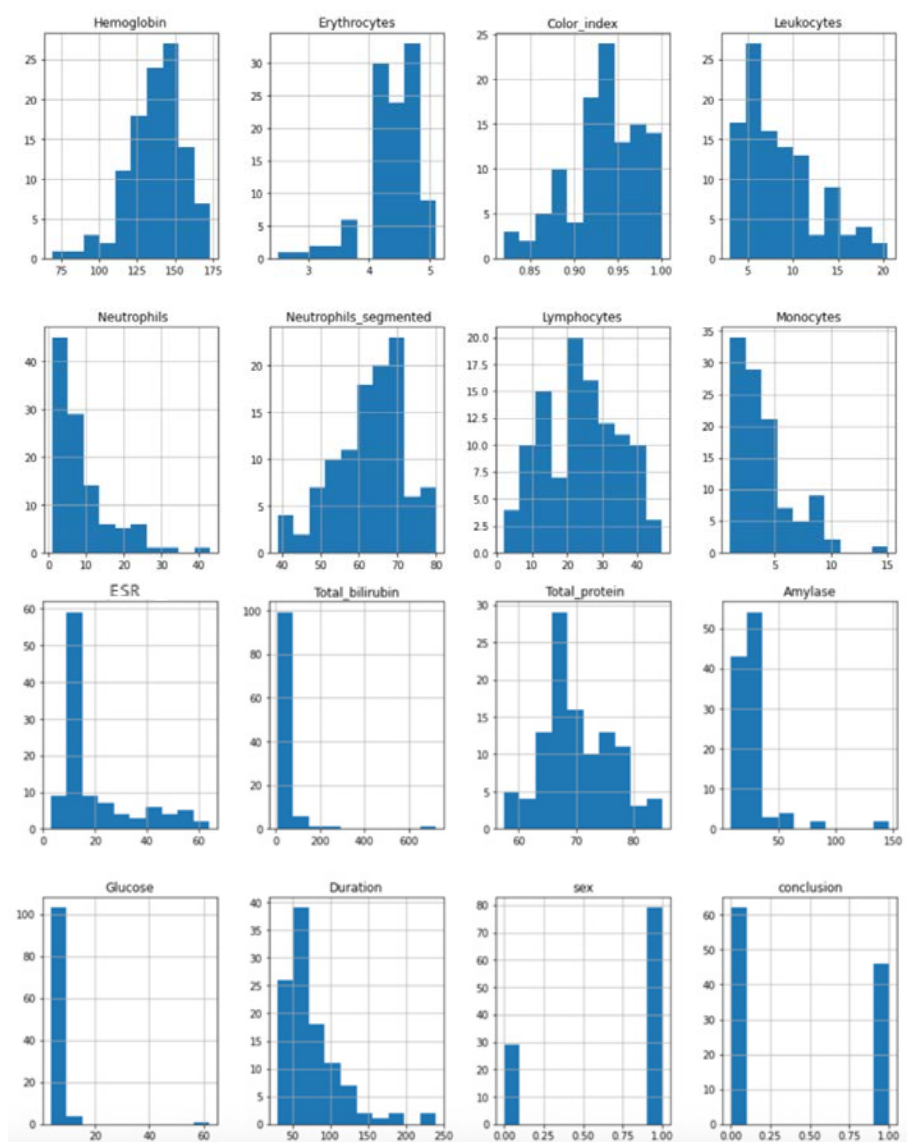


Рис. 1. Гистограммы распределения значений показателей

Это означает, что для анализа данных доступны не все методы статистического анализа. Вместо этого использовались непараметрические методы, которые позволяют исследовать данные без предположений о характере распределения переменных, включая случаи с нарушением требования нормальности распределения.

Для того чтобы восстановить пропущенные значения, был использован эмпирический закон распределения. Для каждого показателя были определены интервалы распределения данных, по которым затем была рассчитана вероятность попадания значений в каждый из этих интервалов. В качестве замены для пропущенных значений использовались случайные равномерно распределенные значения в интервалах.

Следующим шагом является отбор информативных показателей, необходимых для прогнозирования послеоперационных осложнений [11]. В данной работе исследовался статистический метод для отбора показателей. Статистические тесты могут быть использованы для выбора тех функций, которые имеют самую сильную связь с выходной переменной.

Для реализации использовалась библиотека `scikit-learn` [12], которая предоставляет класс `mutual_info_classif`. Функция расчета энтропии информации показывает, насколько четко определена целевая переменная, если известны значения предиктора [13]. Результат работы данного алгоритма представлен на рис. 2.

Total_bilirubin	0.208521
Lymphocytes	0.130972
Duration	0.072653
Neutrophils	0.067085
Monocytes	0.058802
Erythrocytes	0.050271
Amylase	0.047423
Total_protein	0.035719
ESR	0.025682
Glucose	0.008693
Hemoglobin	0.000000
Color_index	0.000000
Leukocytes	0.000000
Neutrophils_segmented	0.000000
sex	0.000000

Рис. 2. Отбор информативных показателей

Из представленного рисунка можно сделать вывод, что наибольший вклад в прогнозирование выходной переменной вносят следующие показатели: общий билирубин, лимфоциты, длительность операции, нейтрофилы, моноциты, эритроциты, амилаза, общий белок, что соответствует данным, полученным ранее в исследовании [10]. На рис. 3 приведены данные, которые в дальнейшем будут использованы для обучения моделей.

Матрицы неточности, полученные при работе выбранных методов машинного обучения, приведены на рис. 4.

	Neutrophils	Lymphocytes	Monocytes	Erythrocyte	Total_bilirubin	Total_protein	Amylase	Duration
0	9	21	5	15	12.8	67.00	18.2	150
1	2	27	1	8	14.0	66.00	14.0	40
2	6	12	3	15	13.4	77.00	16.8	55
3	12	5	5	15	16.3	72.00	30.1	50
4	6	43	2	18	8.5	63.00	21.0	70
...	...	...	...	...	...	...	...	...
104	5	36	5	35	50.0	69.00	19.4	120
105	6	32	1	15	68.0	68.00	142.2	35
106	8	22	4	45	15.0	68.00	27.0	45
107	26	23	1	40	29.5	79.00	27.0	110
108	2	38	1	15	97.8	64.32	27.0	130

Рис. 3. Итоговая выборка для обучения

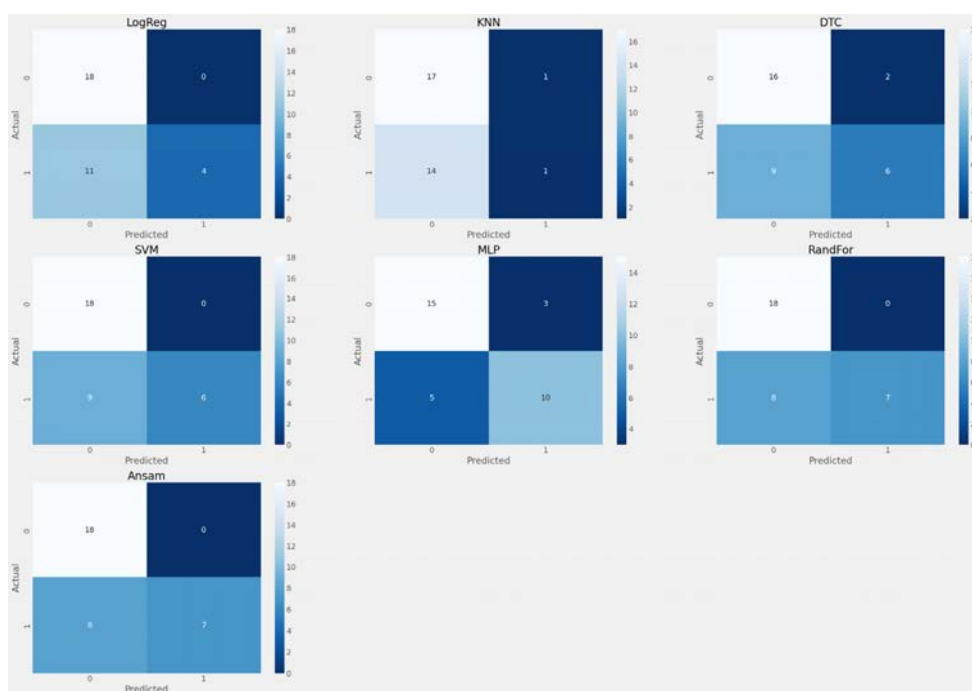


Рис. 4. Матрицы неточности

Из рис. 4 видно, что большинство алгоритмов хорошо определяют класс 0 – отсутствие послеоперационных осложнений, а с определением класса 1 – наличие осложнений – справляются менее качественно и с большей разницей результатов.

Для работы классификатора жесткого голосования были отобраны методы, которые дали наиболее точный прогноз, – метод случайного леса, метод опорных векторов, многослойный персептрон с предварительно подобранной архитектурой [10].

Для оценки моделей использовались матрица неточности, доля правильных ответов алгоритма (accuracy), F1 оценка (f1-score), точность (precision), полнота (recall) и площадь под ROC-кривой (AUC).

Результаты сравнения метрик качества классификации приведены на рис. 5.

	Model	Accuracy	F1	Precision	Recall	AUC
0	LogReg	66.7	42.1	100.0	26.7	0.63
1	KNN	54.5	11.8	50.0	6.7	0.51
2	DTC	66.7	52.2	75.0	40.0	0.64
3	SVM	72.7	57.1	100.0	40.0	0.70
4	MLP	75.8	71.4	76.9	66.7	0.75
5	RandFor	75.8	63.6	100.0	46.7	0.73
6	Ansam	78.8	63.6	100.0	46.7	0.73

Рис. 5. Метрики качества классификации

Из данных, приведенных на рис. 5, видно, что наиболее точный прогноз дает многослойный персептрон (MLP) со следующей архитектурой: один скрытый слой с 5 нейронами и функцией активации «гиперболический тангенс», алгоритмом обучения BFGS; случайный лес (RandFor) и метод опорных векторов (SVM). Эти модели включили в жесткий классификатор голосования [14, 15]. Точность классификатора составила 78,8 %.

Выводы

Применение ансамблевого метода машинного обучения, а именно классификатора средневзвешенного голосования (жесткое голосование), позволило повысить точность классификации до 78,8 %. Данный результат является достаточно хорошим по сравнению классическим методом классификации Помери P-POSSUM, применяемым для прогнозирования осложнений.

Учитывая имеющийся средний процент летальных исходов после операции у больных желчнокаменной болезнью, можно предположить, что применение ансамблей методов машинного обучения для оценки риска операций может снизить уровень летальности.

Список литературы

1. Рындин А. А., Соловьев В. И., Зуй В. С. Маркер системного воспаления как фактор прогноза тяжелых осложнений после радикальной цистэктомии // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2021. Т. 20, № 30. С. 116–123.
2. Котова Д. П., Котов С. В., Гиляров М. Ю., Шеменкова В. С. Использование прогностических шкал в оценке периоперационных осложнений в практике врача-терапевта // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2018. № 17. С. 75–80.
3. Тамакова В. П., Черепнев Г. В. Иммунологические критерии прогноза гнойно-септических осложнений в послеоперационном периоде // Практическая медицина. 2011. № 55. С. 122–124.
4. Коршунов Г. В., Пучиньян Д. М., Шахмартова С. Г. Молекулярные маркеры системного воспалительного ответа и гемокоагуляции при эндопротезировании тазобедренного сустава // Клиническая лабораторная диагностика. 2012. № 2. С. 50–52.
5. Круглов В. Н., Хохлунов С. М., Рубаненко А. О., Шавкунов С. А. Генетические аспекты прогнозирования осложнений после чрескожного коронарного вмешательства у пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST // Медицинский альманах. 2015. № 2. С. 81–83.

6. Clin J. A Comparative Study of Machine Learning Algorithms in Predicting Severe Complications after Bariatric Surgery // *The Future of Artificial Intelligence in Clinical Medicine*. 2019. Vol. 668, iss. 8 (5). P. 1–27.
7. Markus P. M., Martell J., Leister I. [et al.]. Predicting postoperative morbidity by clinical assessment // *British Journal of Surgery*. 2005. Vol. 92, iss. 1. P. 101–106.
8. Datta S., Ruppert M., Giordano Ch. [et al.]. Added Value of Intraoperative Data for Predicting Postoperative Complications: The MySurgeryRisk PostOp Extension // *Journal of Surgical Research*. 2020. Vol. 254. P. 350–363.
9. Mohammed H., Huang Y., Memtsoudis S. [et al.]. Utilization of machine learning methods for predicting surgical outcomes after total knee arthroplasty // *Public Library of Science*. 2022.
10. Dietterich T. G. Ensemble Methods in Machine Learning // *International Workshop on Multiple Classifier Systems*. 2000. January. P. 1–15.
11. Горбаченко В. И., Кузнецов Р. Н., Кузнецова О. Ю. Отбор информативных признаков для прогнозирования послеоперационных осложнений при желчнокаменной болезни // *Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. науч. ст. по материалам XVI Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Приволжский дом знаний*, 2016. С. 91–97.
12. Документация библиотеки sklearn URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (дата обращения: 18.06.2023).
13. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М. : МедиаСфера, 2002. 125 с.
14. Chakraborty A., De R., Chatterjee A., Schwenker F. Filter Method Ensemble with Neural Networks // *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN*. 2019. P. 755–765.
15. Bauer E., Kohavi R. An Empirical Comparison of Voting Classification // *Algorithms: Bagging, Boosting, and Variants. Machine Learning*. 1999. 36.

References

1. Ryndin A.A., Solov'ev V.I., Zuy V.S. Marker of systemic inflammation as a prognostic factor for severe complications after radical cystectomy. *Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj meditsinskoj akademii = Bulletin of the Smolensk State Medical Academy*. 2021;20(30):116–123. (In Russ.)
2. Kotova D.P., Kotov S.V., Gilyarov M.Yu., Shemenkova V.S. The use of prognostic scales in the assessment of perioperative complications in the practice of a general practitioner. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular therapy and prevention*. 2018;(17):75–80. (In Russ.)
3. Tamakova V.P., Cherepnev G.V. Immunological criteria for the prognosis of purulent-septic complications in the postoperative period. *Prakticheskaya meditsina = Practical medicine*. 2011;(55):122–124. (In Russ.)
4. Korshunov G.V., Puchin'yan D.M., Shakhmartova S.G. Molecular markers of systemic inflammatory response and hemocoagulation during hip replacement. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika = Clinical laboratory diagnostics*. 2012;(2):50–52. (In Russ.)
5. Kruglov V.N., Khokhlunov S.M., Rubanenko A.O., Shavkunov S.A. Genetic aspects of predicting complications after percutaneous coronary intervention in patients with acute coronary syndrome with ST segment elevation. *Meditsinskiy al'manakh = Medical almanac*. 2015;(2):81–83. (In Russ.)
6. Clin J. A Comparative Study of Machine Learning Algorithms in Predicting Severe Complications after Bariatric Surgery. *The Future of Artificial Intelligence in Clinical Medicine*. 2019;668(8):1–27.
7. Markus P.M., Martell J., Leister I. et al. Predicting postoperative morbidity by clinical assessment. *British Journal of Surgery*. 2005;92(1):101–106.

8. Datta S., Ruppert M., Giordano Ch. et al. Added Value of Intraoperative Data for Predicting Postoperative Complications: The MySurgeryRisk PostOp Extension. *Journal of Surgical Research*. 2020;254:350–363.
9. Mohammed H., Huang Y., Memtsoudis S. et al. Utilization of machine learning methods for predicting surgical outcomes after total knee arthroplasty. *Public Library of Science*. 2022.
10. Dietterich T.G. Ensemble Methods in Machine Learning. *International Workshop on Multiple Classifier Systems*. 2000;January:1–15.
11. Gorbachenko V.I., Kuznetsov R.N., Kuznetsova O.Yu. Selection of informative signs for predicting postoperative complications in cholelithiasis. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. nauch. st. po materialam XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of informatics in education, management, economics and technology: collection of scientific articles based on materials of the XVI International scientific-technical. conf.* Penza: Privolzhskiy dom znaniy, 2016: 91–97. (In Russ.)
12. *Dokumentatsiya biblioteki sklearn = Documentation of the sklearn library.* (In Russ.). Available at: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (accessed 18.06.2023).
13. Rebrova O.Yu. *Statisticheskii analiz meditsinskikh dannyykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTICA = Statistical analysis of medical data. Application of the STATISTICA application software package.* Moscow: MediaSfera, 2002:125. (In Russ.)
14. Chakraborty A., De R., Chatterjee A., Schwenker F. Filter Method Ensemble with Neural Networks. *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN*. 2019:755–765.
15. Bauer E., Kohavi R. An Empirical Comparison of Voting Classification. *Algorithms: Bagging, Boosting, and Variants. Machine Learning*. 1999:36.

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Юрьевна Кузнецова

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

Olga Yu. Kuznetsova

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Роман Николаевич Кузнецов

начальник управления информатизации,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nahab007@rambler.ru

Roman N. Kuznetsov

Head of the department of informatization,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Викторович Кузьмин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuzmin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 01.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 31.05.2023

Принята к публикации/Accepted 07.06.2023