

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (54)

2025

СОДЕРЖАНИЕ

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

Макришина М. В., Гамидуллаева Л. А.

АГЛОМЕРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ: ДИНАМИКА
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ И ВЫЗОВЫ
ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ.....5

Ленкова О. В.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДИКТИВНОГО ЭКСПЕРТИРОВАНИЯ
В РАМКАХ ОТРАСЛЕВОГО ФОРСАЙТ-
СТРАТЕГИРОВАНИЯ.....22

Солдатова С. С.

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИИ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ХОЗЯЙСТВУЮЩЕГО СУБЪЕКТА36

Шмелева Н. В., Хорошилова Т. И.

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ
РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ
ОТРАСЛИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....47

Полунина Н. Ю. РАСТУЩИЙ ЭКСПОРТ И НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИЙСКОЙ ЧЕЧЕВИЦЫ	60
--	----

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Носков С. И., Беляев С. В., Бычков Ю. А. УЧЕТ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОШИБОК ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ	75
Поляков Е. В., Дмитриева В. В. СИСТЕМА АНАЛИЗА ТЕКСТУРЫ БИОМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	85
Кондырев О. В., Липич А. О., Медведик М. Ю. ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ДИФРАКЦИИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ	95
Бурукина И. П. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОНЛАЙН-КУРСОВ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА	107
Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ВНУТРИСОСУДИСТЫХ КАТЕТЕРОВ	122
Печалин Н. Д. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	134
Демушкина К. М. АГРЕГИРОВАННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕТРИКИ ХАУСДОРФА	147
Печалин Н. Д. ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВАНИЙ ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ: ОТ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ АДАПТИВНЫМИ БАЛАНСАМИ	156

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

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 2 (54)

2025

CONTENT

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

Makrishina M.V., Gamidullaeva L.A.

AGGLOMERATION EFFECTS: DYNAMICS
OF THEORETICAL APPROACHES AND CHALLENGES
FOR REGIONAL DEVELOPMENT5

Lenkova O.V.

IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE EXPERTISE
WITHIN INDUSTRY FORESIGHT STRATEGY22

Soldatova S.S.

METHODS OF PROTECTING CONFIDENTIAL
INFORMATION IN ORDER TO ENSURE
THE ECONOMIC SECURITY OF AN ECONOMIC ENTITY36

Shmeleva N.V., Khoroshilova T.I.

SCENARIO MODELLING OF INCREASING
THE RESOURCE POTENTIAL OF ENTERPRISES
IN THE CONSTRUCTION MATERIALS INDUSTRY47

Polunina N.Yu.

GROWING EXPORTS AND NEW
PROSPECTS FOR RUSSIAN LENTILS60

SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

<i>Noskov S.I., Belyaev S.V., Bychkov Yu.A.</i> ACCOUNTING FOR A GIVEN ERROR LEVEL IN ESTIMATION OF PARAMETERS OF A PIECEWISE-LINEAR REGRESSION MODEL	75
<i>Polyakov E.V., Dmitrieva V.V.</i> BIOMEDICAL IMAGE TEXTURE ANALYSIS SYSTEM	85
<i>Kondyrev O.V., Lapich A.O., Medvedik M.Yu.</i> APPLICATION OF PARALLEL CALCULATIONS IN THE INVERSE DIFFRACTION PROBLEM ON DIELECTRIC OBJECTS WITH INHOMOGENEITIES	95
<i>Burukina I.P.</i> A COMPREHENSIVE APPROACH TO EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ONLINE COURSES.....	107
<i>Kartashova E.D., Muzemnek A.Yu.</i> REVERSE ENGINEERING OF INTRAVASCULAR CATHETERS	122
<i>Pechalin N.D.</i> ANALYSIS OF THE ISSUES OF INCREASING THE EFFICIENCY OF PROJECT ACTIVITIES AT ENTERPRISES OF THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX	134
<i>Demushkina K.M.</i> AGGREGATED EVALUATION OF DIELECTRIC IMPEDANCE SPECTROSCOPY RESULTS BASED ON STATISTICAL PARAMETERS AND HAUSDORFF METRIC	147
<i>Pechalin N.D.</i> TRANSFORMATION OF THE METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF PROJECT MANAGEMENT: FROM NETWORK PLANNING TO ADAPTIVE BALANCE MANAGEMENT	156

Раздел 1

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Section 1

MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 332.01
doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-1

АГЛОМЕРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ: ДИНАМИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ И ВЫЗОВЫ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

М. В. Макришина¹, Л. А. Гамидуллаева²

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Агломерации играют ключевую роль в формировании конкурентоспособности регионов, способствуя концентрации ресурсов, инноваций и человеческого капитала. Понимание механизмов, лежащих в основе агломерационных процессов, позволяет выработать эффективные стратегии для стимулирования экономического роста и повышения устойчивости региональных экономик. Изучается эволюция подходов к исследованию агломерационных эффектов. Систематизированы теории происхождения агломераций и агломерационных эффектов. *Материалы и методы.* Теоретико-методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные проблеме изучения природы агломераций и управления агломерационными процессами. Для выявления ключевых тенденций и закономерностей использован сравнительный анализ существующих теорий агломерации. *Результаты.* Выявлены основные подходы к исследованию агломераций и агломерационных эффектов и проведен анализ их эволюции. *Выводы.* Отмечена тенденция к формированию комплексного подхода к исследованию агломераций.

Ключевые слова: агломерационные эффекты, агломерационные процессы, регион, агломерация, экономическое пространство, концентрация производства, эволюция подходов

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-20328 «Модели и механизмы оптимизации структуры региональной экономики в целях устойчивого развития промышленности».

Для цитирования: Макришина М. В., Гамидуллаева Л. А. Агломерационные эффекты: динамика теоретических подходов и вызовы для регионального развития // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 5–21. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-1

AGGLOMERATION EFFECTS: DYNAMICS OF THEORETICAL APPROACHES AND CHALLENGES FOR REGIONAL DEVELOPMENT

M.V. Makrishina¹, L.A. Gamidullaeva²

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

¹tavpnz@mail.ru, ²gamidullaeva@gmail.com

Abstract. *Background.* Agglomerations play a key role in shaping the competitiveness of regions, contributing to the concentration of resources, innovation and human capital. Understanding the mechanisms underlying agglomeration processes makes it possible to develop effective strategies to stimulate economic growth and increase the sustainability of regional economies. The article is devoted to the study of the evolution of approaches to the study of agglomeration effects. The authors systematize the theories of the origin of agglomerations and agglomeration effects. *Materials and methods.* The theoretical and methodological basis of the research was the works of domestic and foreign scientists devoted to the problem of studying the nature of agglomerations and the management of agglomeration processes. A comparative analysis of existing agglomeration theories was used to identify key trends and patterns. *Results.* The main approaches to the study of agglomerations and agglomeration effects are identified and their evolution is analyzed. *Conclusions.* There is a tendency towards the formation of an integrated approach to the study of agglomerations.

Keywords: agglomeration effects, agglomeration processes, region, agglomeration, economic space, concentration of production, evolution of approaches

Financing: the research was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 25-28-20328 "Models and Mechanisms for Optimizing the Structure of the Regional Economy to Ensure Sustainable Industrial Development".

For citation: Makrishina M.V., Gamidullaeva L.A. Agglomeration effects: dynamics of theoretical approaches and challenges for regional development. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):5–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-1

Введение

Анализ теоретических основ, закономерностей и тенденций пространственной организации экономической деятельности приобретает особую значимость в условиях нарастающих кризисных проявлений, препятствующих достижению устойчивого сбалансированного развития. Данная ситуация детерминирует необходимость научно обоснованного выбора стратегических приоритетов роста региональных пространств. В утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.12.2024 № 4146-р «Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года» агломерации определены как приоритетные направления пространственного развития страны [1]. Именно агломерации становятся областями социально-экономического развития государства

за счет следующих факторов: наличия рынка сбыта продукции и развитой производственной, транспортной и логистической инфраструктуры; концентрации производства и инновационного потенциала для развития различных видов экономической деятельности; более тесного общения людей и предпринимательского сообщества; более высокого уровня развития социальной сферы, широких возможностей для самореализации граждан, в первую очередь профессиональной [2].

В условиях нарастающего интереса к проблеме пространственного развития в значительной степени активизировались агломерационные исследования. Особенность пространственного развития регионов России состоит в том, что сложившиеся агломерации по сути являются образованиями регионального уровня, так как их эффекты распространяются на уровне всего региона. Растет интерес в стратегическом планировании к фиксации статуса региональных городских агломераций. На конец 2024 г. в системе «Гарант» было зарегистрировано более 9000 нормативно-правовых актов, связанных с агломерациями, в форме стратегических документов, программ, бюджетов регионального и муниципального уровней и т.д. Это подогревает интерес региональных властей к формированию данных территориальных образований даже при условии отсутствия объективных предпосылок к этому, что не приведет в конечном итоге к получению позитивных агломерационных эффектов.

Исследованию агломераций и генерируемых ими экономических и социальных эффектов уделяется повышенное внимание и со стороны зарубежного и российского научных сообществ. Отечественные подходы к изучению агломераций появились во второй половине 1980-х гг. Под агломерацией чаще всего понимают «сформированную группировку городских и сельских территорий, объединенных хорошо развитой транспортной системой, характеризующуюся интенсивными производственными, трудовыми, рекреационными и культурными связями» [3]. В определениях российских авторов просматривается три основных подхода. Агломерация рассматривается как пространство с взаимосвязанными населенными пунктами, накапливающими население, хозяйствующих субъектов и инфраструктуру (А. Г. Гранберг, Н. В. Зубаревич и др.). Согласно второму подходу агломерация – это динамичная территориальная социально-экономическая система, включающая городские и сельские населенные пункты, которые сильно связаны с ядром (Е. М. Бухвальд, В. Н. Лексин, Ю. В. Подопригора и др.). В соответствии с третьим подходом агломерации следует рассматривать в качестве драйверов социально-экономического, инновационного и территориального развития (А. И. Татаркин, Е. Г. Анимица и др.). Формирование и развитие агломераций, как правило, сопровождается агломерационным эффектом.

Исследование эволюции подходов к изучению агломерационных эффектов в современных условиях России становится особенно актуальным в свете динамичных изменений в экономической среде и нарастающих вызовов, связанных с глобализацией и цифровизацией. Агломерации играют ключевую роль в формировании конкурентоспособности регионов, способствуя концентрации ресурсов, инноваций и человеческого капитала. Понимание механизмов, лежащих в основе агломерационных процессов, позволяет выработать эффективные стратегии для стимулирования экономического роста и повышения устойчивости региональных экономик. В условиях современных кризисов

и неопределенности данное исследование может внести значительный вклад в разработку рекомендаций по оптимизации пространственной организации экономической деятельности в России.

Материалы и методы

Исследование проводилось на методологической базе общесистемных принципов с использованием общенаучных методов, в числе которых методы описания, анализа, индукции, сравнения, классификации, исторический метод и др. Теоретико-методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные проблеме изучения природы агломераций и управления агломерационными процессами.

Результаты

Для выявления ключевых закономерностей и характерных особенностей агломераций необходимо провести ретроспективный анализ эволюции экономической природы изучения агломерационных процессов. Агломерационные эффекты представляют собой преимущества, возникающие в результате концентрации экономической деятельности и населения в определенных географических зонах. Исследования в этой области прошли несколько этапов эволюции, начиная с классических экономических теорий и заканчивая современными подходами, учитывающими сложные социальные и экологические факторы.

Проведенный анализ литературных источников позволяет заключить, что в проблемном поле исследования агломераций и создаваемых ими агломерационных эффектов сформировались следующие теоретические подходы: экономический, географический, управленческий и комплексный (рис. 1).



Рис. 1. Основные подходы к исследованию агломераций (составлено авторами)

Основные положения теории агломераций и новизна в представлении агломерационных эффектов в сложившихся подходах к исследованию представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика подхода и новизна в представлении
агломерационных эффектов¹

Период, год	Авторы	Характеристика подхода и новизна в представлении агломерационных эффектов
1	2	3
<i>Экономический подход</i>		
1890	А. Маршалл	Агломерация возникает в процессе концентрации производства вблизи рынка сбыта или рынка поставок. Агломерационный эффект представлен в виде экономии от концентрации производства
1909	А. Вебер	Агломерация возникает на какой-либо территории, где сосредотачивается промышленность. Агломерационный эффект выражается в минимизации затрат
1940	А. Леш	Агломерация возникает при оптимальном размещении производства, зависящем от разных факторов. Агломерационный эффект выражается не только в минимизации издержек, но и в максимизации прибыли
1960	Ф. Перру	Агломерация (полос роста) возникает из совокупности городов, располагающих комплексом быстроразвивающихся производств. Агломерационный эффект представляет собой экономическую выгоду от территориальной концентрации производств, экономических и социальных объектов в агломерации
1962– 1986	К. Эрроу и П. Ромер	Агломерация возникает при концентрации отрасли производства и распространения знаний. Агломерационный эффект выражается в инновационном росте
1969	Дж. Джейкобс	Агломерация возникает при концентрации разных отраслей производства. Агломерационный эффект выражается в инновационном росте, возникающем вследствие обмена идеями соседствующих предприятий
2004	Ж. Дюрантон и Д. Пуга	Агломерация возникает при концентрации узкоспециализированных производств. Агломерационный эффект возникает за счет совместного использования благ, а также объединения и обучения людей
2017	Н. В. Зубаревич	Агломерация возникает вследствие притяжения населения в наиболее развитые центры. Агломерационный эффект выражается в экономическом росте без принудительного объединения в агломерацию «сверху»
2020	С. Н. Раствор- цева и Л.Т. Снитко	Агломерация возникает при концентрации производства в регионе. Агломерационный эффект выражается в росте экономики за счет полноты использования региональной специализации

¹ В таблице представлены лишь некоторые представители данных подходов.

Окончание табл. 1

1	2	3
Географический подход		
1950	Э. Гувер	Агломерация возникает на территории крупных городов. Агломерационный эффект возникает из-за концентрации производства на городской территории, в результате чего снижаются издержки производства (эффект локализации)
1958	П. И. Дубровин	Агломерация возникает на территории близко расположенных муниципальных образований. Агломерационный эффект выражается в росте экономики вследствие налаживания тесных связей (производственный, трудовых, бытовых и т.д.)
1973	М. Руже	Агломерация возникает при выходе деятельности в близлежащие населенные пункты. Агломерационный эффект возникает при грамотном расширении административных границ
2007	Г. М. Лаппо	Агломерация возникает на определенной территории. Агломерационный эффект возникает при развитии всех составляющих за счет интенсивного взаимодействия
2010	Е. Г. Анимца	Агломерация возникает как совокупность поселений, группирующихся в города. Агломерационный эффект возникает от близкого расположения экономических объектов, объединенных различными связями
Управленческий подход		
1966	Дж. Фридман	Агломерация возникает вокруг развитого города. Агломерационный эффект возникает при сглаживании разрывов между агломерациями и периферией
2011	В. Н. Лексин	Агломерация возникает на территории коммуникационно и инфраструктурно связанных поселений. Для проявления агломерационных эффектов необходима деятельность по налаживанию коммуникаций между органами власти и бизнес-сообщества
Комплексный подход		
1999	М. Фуджита, П. Кругман, Э. Вейнблс	Агломерация возникает в точках с наилучшими конкурентными преимуществами. Агломерационный эффект возникает не столько от специализации отдельных частей агломерации, сколько от разнообразия, диверсификации экономической, социальной и культурной жизнедеятельности территории
2010	Ю. В. Павлов	Агломерация – это группировка городских и сельских территорий с развитой транспортной системой, интенсивными производственными, трудовыми, рекреационными и культурными связями. Агломерационный эффект возникает в результате хозяйственной деятельности и взаимодействия агентов: населения, предприятий, органов региональной власти и местного самоуправления. При этом возникающий агломерационный эффект может как положительно, так и отрицательно влиять на развитие региона

В экономике термин «агломерация» впервые введен американским ученым А. Вебером. Он определил агломерацию как «сосредоточение промышленного производства в каком-либо месте, причем сюда включается как сосредоточение в виде простого расширения – укрупнения отдельных производственных единиц, так и соединение в одном месте большего или меньшего числа таких единиц, раньше рассеянных по территории», а агломерационный эффект будет достигаться за счет «минимизации производственных издержек» [4]. А. Вебер уточнил факторы деагломерирования, которые детерминируют не локализационные, а распределенные эффекты. Он систематизировал факторы, влияющие на размещение производственных систем, включая транспортные издержки и доступность ресурсов, по их влиянию, степени общности и проявлениям. Теория экономического ландшафта А. Леша (1940) акцентирует внимание на рыночном зонировании, что позволяет увязать административную, рыночную и транспортную структуры хозяйства. Теория диффузии инноваций Т. Хагерстранда (1950-е гг.) подтверждает, что распространение новых идей и технологий имеет четко выраженный пространственный ракурс, что также влияет на агломерационные процессы. Традиционные факторы, влияющие на размещение производственных мощностей, такие как доступность материальных ресурсов, затраты на труд и транспорт, постепенно теряют свою значимость. В настоящее время внимание сосредоточено на более современном аспекте – инфраструктурном обеспечении, а также на вопросах охраны окружающей среды и нематериальных составляющих процесса размещения (культурных инициативах, рекреационных услугах, креативном капитале региона и др.).

Теория полюсов роста, предложенная Т. Мюрдалем в 1957 г., утверждает, что полюса роста обеспечивают региональное развитие, параллельно усиливая отставание относительно слаборазвитых регионов. В рамках теории территориально-производственных комплексов, разработанной М. К. Бандманом в 1980 г., полюса роста рассматриваются в качестве агломераций, где сосредоточены производства. Перечисленные идеи находят широкое практическое применение при разработке стратегий пространственного развития, а также используются при создании территорий с преференциальными режимами, в частности свободных экономических зон, а также технопарков. В целом теория полюсов роста основывается на внутренних ресурсах для территориального развития и включает аспекты специализации и пространственной агломерации, что подразумевает размещение крупных производств в городах-агломерациях.

В конце XIX в. английский экономист А. Маршалл описал агломерацию как «концентрацию большого числа мелких однородных предприятий в одной местности». Он же впервые указал на наличие агломерационных эффектов от такой концентрации предприятий, которые проявляются в выгодах от наличия общего рынка сбыта продукции, сокращения транспортных издержек и полученных в результате взаимодействия экономических агентов новых знаний и технологий [5]. Согласно А. Маршаллу, к эффектам агломерации относятся эффекты урбанизации, кластеризации и диверсификации. Маршалл подчеркивал, что концентрация производств в определенных регионах способствует обмену знаниями и инновациями. Иоганн Генрих фон Тюнен, один из основоположников теории оптимального размещения, в своей работе «Изолированное

государство» (1826) предложил теорию сельскохозяйственного размещения, где расстояние до рынка определяет типы сельскохозяйственного производства [6]. Его работа стала основой для дальнейших исследований в области пространственной экономики. Вальтер Кристаллер в своей теории центральных мест (1933) предложил модель, объясняющую распределение городов и их функций в пространстве. Он утверждал, что экономическая активность распределяется равномерно, создавая иерархию центров, что способствует агломерационным эффектам.

Позднее теорию агломерационных эффектов по Маршаллу развили и дополнили К. Эрроу и П. Ромер. Ими была выдвинута идея экономического роста, основанного на инвестициях в знания, инновации и человеческий капитал [7, 8]. Исследователи сосредоточились на процессах диффузии инноваций, осуществляемых между предприятиями определенной отрасли в пространстве агломерации. Эти закономерности стали основой для формирования эффектов локализации, или MAR-эффектов, названных по первым буквам упомянутых выше фамилий ученых Маршалла, Эрроу и Ромера (Marshall, Arrow, Romer).

Кеннет Эрроу исследовал влияние информации и знаний на экономическое развитие. Он подчеркивает, что агломерация способствует обмену знаниями и инновациями, что, в свою очередь, ведет к экономическому росту. Поль Ромер акцентирует внимание на роли знаний и технологий в экономическом росте. Его модель эндогенного роста показывает, как агломерация может способствовать инновациям и повышению производительности через концентрацию интеллектуального капитала.

Дж. Джейкобс утверждала, что экономический рост городской агломерации во многом зависит от расположенных в ней производственных и трудовых ресурсов [9]. Агломерационные эффекты, по ее мнению, возникают от межотраслевых взаимодействий и внутриагломерационных перетоков информации. Джейн Джейкобс в своей книге «Смерть и жизнь больших американских городов» (1961) подчеркивает важность разнообразия и смешанного использования земли для создания успешных городских пространств. Она утверждает, что агломерация способствует инновациям и экономическому развитию через взаимодействие людей и идей, что делает города центрами экономической активности [10]. Одним из ключевых аспектов теории Джейкобс является идея о том, что разнообразие в городских пространствах способствует инновациям и экономическому росту. Она утверждает, что смешение различных видов деятельности и профессий создает условия для обмена идеями и знаниями, что, в свою очередь, приводит к появлению новых продуктов и услуг. Это разнообразие также способствует формированию более устойчивых экономических систем, способных адаптироваться к изменениям. Джейкобс подчеркивает важность плотности населения и близости различных видов деятельности для создания агломерационных эффектов. Плотные городские пространства способствуют взаимодействию между людьми и предприятиями, что увеличивает вероятность возникновения новых идей и инноваций. Она утверждает, что высокие уровни взаимодействия между различными участниками городской экономики создают динамичные и адаптивные системы, способные к саморегуляции и развитию.

Важным аспектом теории Джейкобс является акцент на роли местных сообществ в формировании агломерационных эффектов. Джейкобс утверждает, что активное участие граждан в жизни города и их взаимодействие с местными предприятиями не только улучшают качество жизни, но и способствуют экономическому развитию, так как местные сообщества лучше понимают свои потребности и могут адаптироваться к изменениям.

В экономическом подходе устоялось разделение агломерационных эффектов на два типа: эффекты кластеризации (локализации) и эффекты урбанизации. Эффекты кластеризации принято называть Маршаллианскими эффектами (MAR-эффектами). Основной характеристикой MAR-эффектов является активное взаимодействие между предприятиями, работающими в сопряженных отраслях, что обеспечивает рост инноваций, генерацию новых знаний и снижение транзакционных затрат. Это достигается формированием единого рынка, а также развитием инфраструктуры в пространстве агломерации. Эффекты урбанизации получили название Джейкобс-эффектов – от фамилии вышеупомянутой Дж. Джейкобс [11]. Выделяют также третий вид агломерационных эффектов, который называется Портер-эффектами. М. Портер установил, что наиболее конкурентоспособные предприятия, работающие в одной отрасли на международном уровне, не распределены случайным образом по странам, а имеют склонность к сосредоточению в одной стране или даже в конкретном регионе. Портер-эффекты тесно связаны с MAR-эффектами, поскольку кластеры формируются в тех местах, где уже наблюдаются эффекты локализации.

Источники MAR- и Джейкобс-эффектов подробно исследовали Ж. Дюрантон и Д. Пуга. Ученые выделили несколько механизмов, приводящих к агломерационному эффекту: совместное создание и использование неделимых и дискретных благ; разнообразие благ и производителей; выгода от узкой специализации и распределения рисков [12].

Среди отечественных ученых, которые исследуют агломерационные эффекты в рамках экономического подхода, можно выделить П. В. Воробьева, Н. Б. Давидсона, Н. В. Кисляк, П. Д. Кузнецова [13], Е. С. Купенко [11], С. Н. Растворцеву, Л. Т. Снитко [14]. Н. Н. Киселева, К. В. Барвин и А. В. Каратунов обобщают результаты многочисленных исследований и выделяют три основных типа агломерационного эффекта:

- первый тип состоит в возможности совместного использования различных локальных объектов, услуг, поставщиков сырья и промежуточных товаров, а также трудовых ресурсов;

- второй тип связан со снижением транзакционных издержек, обеспечиваемым предложением со стороны поставщиков промежуточных товаров, что позволяет компаниям оптимизировать свои затраты и улучшить финансовые показатели;

- третий тип представляет собой объединение рабочей силы, что, в свою очередь, предотвращает появление разнообразных экономических шоков и способствует более стабильному развитию рынка труда в регионе [15].

Географический подход к исследованию агломерационных эффектов применен в работах Э. Гувера, который рассматривал вопросы «экономии городских концентраций», т.е. агломерационный эффект выражается в со-

средоточении экономического пространства (промышленных предприятий, населенных пунктов, инфраструктурных связей и т.д.) вокруг крупных городских центров [16].

Причины агломерационного эффекта в пространстве региона также исследовали и исследуют отечественные ученые: Е. Г. Анимца [17], Г. М. Лаппо [18], П. А. Лавриненко, Т. Н. Михайлова, А. А. Ромашина, П. А. Чистяков [19]. Следует отметить, что определение, предложенное географом-урбанистом Г. М. Лаппо, считается классическим и широко распространенным в исследовательской среде. Согласно его мнению, «агломерации представляют собой компактные территориальные объединения поселений, преимущественно городского характера, которые связаны между собой разнообразными и интенсивными взаимодействиями, включая хозяйственные, трудовые, культурно-бытовые и рекреационные связи» [18].

На стыке экономического и географического подходов исследованием агломераций и агломерационных эффектов занимались Н. Н. Баранский [20], Н. В. Зубаревич [21], Н. Н. Колосовский [22] и др. По их мнению, агломерационный эффект будет выражаться в росте производительности труда, сокращении транспортных издержек за счет рационального использования местных природных ресурсов.

Вопросы становления и развития агломераций привлекают внимание специалистов в различных областях науки: социологии, экономики, экологии, градостроительства и т.д. Проблемы управления агломерационными процессами находятся в фокусе внимания федеральных, региональных и местных органов власти. В. А. Колясников в своей работе «Развитие понятия "городская агломерация"» указывает на принятую в 2003 г. Европейским советом градостроителей Новую Афинскую Хартию. В Хартии сформулирована «концепция взаимосвязанных городов». Согласно этой концепции, процесс развития территорий ориентирован на усиление партнерского взаимодействия и совместного использования различных ресурсов в социальном, политическом, экономическом и технологическом, экологическом и градостроительном отношениях [23]. В Российской Федерации существует Институт ГИПРОГОР, который занимается территориальным планированием агломераций [24]. Агломерационный эффект в данном подходе будет заключаться в развитии межмуниципального сотрудничества, создании административного органа управления развития агломерацией, реализации совместных межмуниципальных инфраструктурных объектов.

Представители новой экономической географии, такие как М. Фуджита, П. Кругман и Э. Венаблес, подчеркивают, что ключевую роль в формировании агломерационных эффектов играют разнообразие и диверсификация экономической, социальной и культурной активности на территории [25]. В своих работах Пол Кругман развил теорию агломерации, акцентируя внимание на том, как концентрация производств в определенных регионах способствует снижению издержек и повышению производительности.

Эдвард Венаблес в своих исследованиях, в частности в работе «Международная торговля нового типа» (1996), анализирует циклическое движение факторов производства и его влияние на агломерацию, подчеркивая важность вертикальных связей в производственных системах.

Масахиро Фуджита также внес значительный вклад в изучение агломерационных эффектов, рассматривая внешние денежные эффекты на примере

фирм, которые предпочитают размещаться вблизи районов с высокой концентрацией потребителей и низкой концентрацией фирм, что связано с высокой конкуренцией.

В новых концепциях пространственного развития, таких как теория «полюсов роста» Ф. Перру [26], теория «центральных мест» В. Кристаллера [27], пространственная модель города У. Алонсо [28], агломерационный эффект связывают с региональным ростом и пространственной организацией. Основные недостатки теорий, развивающих концепцию полюсов роста, заключаются в их склонности к обобщению и игнорированию уникальных характеристик отдельных регионов. Каждая территория имеет свои социальные, экономические и культурные особенности, которые могут существенно влиять на процесс роста. Применение универсальных моделей без учета этих факторов может привести к неэффективным стратегиям развития и усугублению существующих проблем. Не учитываются новые формы пространственной организации, такие как промышленные и региональные кластеры, а также сетевизация экономики [29].

Многие теории полюсов роста не учитывают факторы устойчивости и устойчивого развития. Полюсы роста могут быть подвержены экономическим кризисам, изменениям в рыночной конъюнктуре и экологическим проблемам. Например, чрезмерная концентрация производства в одном регионе может привести к экологическим катастрофам, что, в свою очередь, негативно скажется на экономическом развитии. Таким образом, отсутствие внимания к вопросам устойчивости делает эти теории менее применимыми в условиях современных вызовов.

Эти теории часто не учитывают, как именно инновации распространяются за пределы этих полюсов. Важно понимать, что инновации могут возникать и развиваться в менее развитых регионах и их игнорирование может привести к недооценке потенциала этих территорий. Кроме того, современные экономические процессы все больше зависят от сетевых взаимодействий между различными участниками. Теории полюсов роста часто недостаточно акцентируют внимание на важности этих взаимодействий, что может привести к недооценке роли малых и средних предприятий, стартапов и местных сообществ в процессе экономического развития. Сетевые связи могут способствовать более равномерному распределению ресурсов и знаний, что, в свою очередь, может смягчить негативные последствия концентрации роста.

Пространственные эффекты, возникающие в результате кластеризации – концентрации взаимосвязанных предприятий и поставщиков услуг в определенных отраслях, включая конкурирующие, но сотрудничающие компании, не находят должного отражения в теориях полюсов роста.

Хотя теоретические основы кластерной теории были заложены еще до появления концепции кластеров в работах таких ученых, как А. Вебер, И. Тюнен, А. Леш, В. Лаундхардт, Д. Рикардо, Э. Хекшер и А. Смит, современное понимание кластерной теории связано с исследованиями М. Портера [30]. В дальнейшем теория Портера была развита в трудах ряда западных экономистов, в частности П. Кругманом, исследовавшим процесс кластеризации с позиций сетевой экономики [29]. Кластерная теория представляет собой мощный инструмент для исследования агломерационных эффектов, предлагая комплексный, междисциплинарный и эмпирически обоснованный подход к анализу

экономических процессов. Преимущества этой теории заключаются в ее способности учитывать сложные взаимодействия между участниками, акцентировать внимание на инновациях и конкурентоспособности, а также поддерживать политику регионального развития. В условиях глобализации и ускоряющихся темпов экономических изменений кластерная теория становится все более актуальной для понимания динамики агломерационных процессов и их влияния на экономическое развитие регионов. Кластеры рассматриваются как сложные системы, в которых взаимодействуют различные участники – предприятия, государственные структуры, научные учреждения и местные сообщества. Такой подход позволяет более глубоко понять механизмы, способствующие агломерационным эффектам, включая обмен знаниями, инновациями и ресурсами. Кластерная теория акцентирует внимание на роли инноваций в создании конкурентных преимуществ, что является важным аспектом агломерационных эффектов.

Таким образом, процесс эволюции подходов к исследованию агломерационных эффектов можно представить следующим образом (рис. 2).



Рис. 2. Эволюция подходов к исследованию агломерационных эффектов (составлено авторами)

Заключение

Эволюция подходов к исследованию теории возникновения агломераций и агломерационных эффектов свидетельствует о высоком интересе к данному вопросу со стороны научного сообщества и органов государственной власти. Зародившийся в начале XX в. экономический подход к исследованию агломераций и проявляемых ими агломерационных эффектов и на текущий момент привлекает научный интерес зарубежных и отечественных ученых. Анализ подходов к исследованию агломерационных эффектов позволяет проследить общую тенденцию, состоящую в формировании комплексного подхода к исследованию агломераций, при котором агломерационные эффекты оцениваются как со стороны экономического и инновационного развития территории, так и с точки зрения положительного влияния на качество жизни населения территориальных образований.

Безусловно, теория агломераций развивается и под воздействием текущих трендов. Современные исследования акцентируют внимание на роли технологий и цифровизации в формировании агломерационных эффектов. Появление новых форм работы и удаленных технологий изменяет традиционные представления о пространственной организации экономической деятельности. В условиях глобальных вызовов, таких как изменение климата, исследуются новые подходы к пространственному развитию, которые учитывают экологические аспекты и устойчивость. Кроме того, современные исследования акцентируют внимание на создании инновационных экосистем, где взаимодействие между различными акторами (государством, бизнесом, научными учреждениями) способствует развитию агломерационных эффектов [31–33].

Таким образом, эволюция подходов к определению и происхождению агломерационных эффектов отражает изменения в экономической теории и практике, а также необходимость учитывать широкий спектр факторов, влияющих на развитие территорий. Современные исследования акцентируют внимание на роли технологий и цифровизации в формировании агломерационных эффектов, что открывает новые горизонты для дальнейших исследований в этой области.

Список литературы

1. Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года : распоряжение Правительства Российской Федерации № 4146-р от 28.12.2024 URL: <http://static.government.ru/media/files/ttXJCZ4PNa7bmTrRgcuPwoIQa8SYR91B.pdf> (дата обращения: 20.05.2025).
2. Алтухов А. И. Развитие агломераций: вопросов больше, чем ответов // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2024. № 3. С. 5–15.
3. Павлов Ю. В., Хмелева Г. А. Концепция региональной агломерационной политики // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 2. С. 297–316. doi: 10.18334/erp.13.2.117169
4. Вебер А. Теория размещения промышленности с приложением работы Шлира «Промышленность Германии с 1860 г.». Л. ; М. : Книга, 1926. С. 86–87.
5. Маршалл А. Принципы экономической науки : в 3 т. / пер. с англ. и вступ. ст. Дж. М. Кейнса. М. : Прогресс-Универс, 1993. Т. 1. С. 348–349.
6. Тюнен И. Г. Изолированное государство / пер. Е. А. Торнеус ; под ред. А. А. Рыбникова. М. : Экономич. жизнь, 1926. 326 с. URL: <https://libr.msu.by/handle/123456789/18478> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Arrow K. The Economic Implications of Learning by Doing // Review of Economic Studies. 1962. June. P. 155–173.
8. Romer P. M. Increasing Returns and Long-Run Growth // The Journal of Political Economy. 1986. October. P. 1002–1037.
9. Jacobs J. The Economy of Cities. NY : Random House, 1969. P. 268.
10. Коломак Е. А. Почему возникают и растут города? Объяснения теоретических и эмпирических исследований // Пространственная экономика. 2018. № 2. С. 134–153.
11. Куценко Е. С. Зависимость от предшествующего развития пространственного размещения экономических агентов и практика оценки агломерационных эффектов // XIII Международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества : в 4 кн. / отв. ред. Е. Г. Ясин. М. : ИД НИУ ВШЭ, 2012. Кн. 3. С. 317–329.

12. Duranton G., Puga D. Micro-Foundations of Urban Agglomeration Economies // NBER Working Paper № w9931. 2003. September. URL: <https://ssrn.com/abstract=439613> (дата обращения: 20.05.2025).
13. Воробьев П. В., Давидсон Н. Б., Кисляк Н. В., Кузнецов П. Д. Разнообразие и концентрация отраслей в российских городах как факторы экономической эффективности // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2014. № 6. С. 4–18.
14. Растворцева С. Н., Снитко Л. Т. Региональная специализация и агломерационные эффекты в экономике России // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnaya-spetsializatsiya-i-aglomeratsionnye-effekty-v-ekonomike-rossii> (дата обращения: 24.12.2024).
15. Киселева Н. Н., Бавина К. В., Каратунов А. В. Методологические подходы к исследованию агломерационных процессов // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 422–426. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41109> (дата обращения: 20.05.2025).
16. Hoover E. M. Location of Economic Activity. NY ; Toronto ; L. : McGraw-Hill, 1948. P. 120.
17. Анимича Е. Г. Методологические принципы исследования городских агломераций // Размещение производительных сил Урала : сб. науч. тр. Вып. 9. Свердловск, 1974.
18. Лаппо Г. М. Развитие городских агломераций в СССР. М. : Наука, 1978.
19. Лавриненко П. А., Михайлова Т. Н., Ромашина А. А., Чистяков П. А. Агломерационные эффекты как инструмент регионального развития // Проблемы прогнозирования. 2019. № 3 (174). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aglomeratsionnye-effekty-kak-instrument-regionalnogo-razvitiya> (дата обращения: 20.05.2025).
20. Баранский Н. Н. Экономическая география СССР. М., 1949.
21. Зубаревич Н. В. Регионы России: неравенство, кризис, модернизация. М. : Независимый институт социальной политики, 2010. 160 с.
22. Колосовский Н. Н. Теория экономического районирования. М. : Мысль, 1997. С. 35.
23. Колясников В. А. Развитие понятия «Городская агломерация» // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitiye-ponyatiya-gorodskaya-aglomeratsiya> (дата обращения: 20.05.2025).
24. Гипрогор. URL: <https://giprogor.ru/obinstitute#Aboutthecompany> (дата обращения: 20.05.2025).
25. Fujita M., Krugman P., Venables A. J. The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade. Cambridge, MA : MIT Press, 1999.
26. Perroux F. L'économie du XXe siècle. Paris : Presses universitaires de France, 1961. P. 346.
27. Christaller W. Die zentralen Orte in Süddeutschland. Jena : Gustav Fischer, 1933. P. 331.
28. Alonso W. Location and Land Use. Towards a General Theory of Land Rent. Cambridge, Massachusetts, 1964. P. 204.
29. Наумов И. В., Седельников В. М., Аверина Л. М. Эволюция теорий пространственного развития: принципиальные особенности и современные задачи исследований // Журнал экономической теории. 2020. Т. 17, № 2. С. 383–398.
30. Портер М. Международная конкуренция. М. : Международные отношения, 1993. 378 с.
31. Gamidullaeva L. A., Grosheva E. S. An Ecosystem Approach to Balanced Territorial Development // Administrative consulting. 2024. № 1 (181). P. 144–162. doi: 10.22394/1726-1139-2024-1-144-162 EDN: LTFVEN

32. Гамидуллаева Л. А. Промышленный кластер региона как локализованная экосистема: роль факторов самоорганизации и коллаборации // *π-Economy*. 2023. Т. 16, № 1. С. 62–82. doi: 10.18721/JE.16105 EDN: WHMFFY
33. Гамидуллаева Л. А., Страхов Е. П. Эволюция концепции кластерного развития: от агломерационной теории к экосистемам // *МИР (Модернизация. Инновации. Развитие)*. 2023. Т. 14, № 1. С. 106–125. doi: 10.18184/2079-4665.2023.14.1.106-125 EDN: ZVXPJN

References

1. *Ob utverzhdenii Strategii prostranstvennogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda s prognozom do 2036 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 4146-r ot 28.12.2024 = On approval of the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2030 with a Forecast up to 2036: Decree of the Government of the Russian Federation № 4146-r dated 12.28.2024.* (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/ttXJCZ4PNa7bmTrRgcUPwoIQA8SYR91B.pdf> (accessed 20.05.2025).
2. Altukhov A.I. The development of agglomerations: there are more questions than answers. *Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyaystve = Economics, labor, management in agriculture*. 2024;(3):5–15. (In Russ.)
3. Pavlov Yu.V., Khmeleva G.A. The concept of regional agglomeration policy. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo = Economics, entrepreneurship and law*. 2023;13(2):297–316. (In Russ.). doi: 10.18334/epp.13.2.117169
4. Veber A. *Teoriya razmeshcheniya promyshlennosti s prilozheniem raboty Shlira «Promyshlennost' Germanii s 1860 g.» = The theory of industrial distribution with the application of Schlier's work "German industry since 1860".* Leningrad; Moscow: Kniga, 1926:86–87. (In Russ.)
5. Marshall A. *Printsipy ekonomicheskoy nauki: v 3 t. Per. s angl. i vstup. st. Dzh.M. Keynsa = Principles of Economic Science : in 3 volumes / translated from English and intro by J. M. Keynes.* Moscow: Progress-Univers, 1993;1:348–349. (In Russ.)
6. Tyunen I.G. *Izolirovannoe gosudarstvo. Per. E.A. Torneus = The Isolated State / translated by E. A. Torneus.* Moscow: Ekonomich. zhizn', 1926:326. (In Russ.). Available at: <https://libr.msu.by/handle/123456789/18478> (accessed 20.05.2025).
7. Arrow K. The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies*. 1962;June:155–173.
8. Romer P.M. Increasing Returns and Long-Run Growth. *The Journal of Political Economy*. 1986;October:1002–1037.
9. Jacobs J. *The Economy of Cities*. New York: Random House, 1969:268.
10. Kolomak E.A. Why do cities arise and grow? Explanations of theoretical and empirical research. *Prostranstvennaya ekonomika = spatial economics*. 2018;(2):134–153. (In Russ.)
11. Kutsenko E.S. Dependence on the previous development of spatial distribution of economic agents and the practice of assessing agglomeration effects. *XIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva: v 4 kn. = XIII International Scientific Conference on the Problems of Economic and Social Development : in 4 volumes.* Moscow: ID NIU VShE, 2012;(bk.3):317–329. (In Russ.)
12. Duranton G., Puga D. Micro-Foundations of Urban Agglomeration Economies. *NBER Working Paper № w9931*. 2003;September. Available at: <https://ssrn.com/abstract=439613> (accessed 20.05.2025).
13. Vorob'ev P.V., Davidson N.B., Kislyak N.V., Kuznetsov P.D. Diversity and concentration of industries in Russian cities as factors of economic efficiency. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of UrFU. Series: Economics and Management*. 2014;(6):4–18. (In Russ.)
14. Rastvortseva S.N., Snitko L.T. Regional specialization and agglomeration effects in the Russian economy. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz = Economic and social changes: facts, trends, forecast*. 2020;(3). (In Russ.). Available at:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnaya-spetsializatsiya-i-aglomeratsionnye-effekty-v-ekonomike-rossii> (accessed 24.12.2024).
15. Kiseleva N.N., Bavina K.V., Karatunov A.V. Methodological approaches to the study of agglomeration processes. *Fundamental'nye issledovaniya = Basic research*. 2016;(12-2):422–426. (In Russ.). Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41109> (accessed 20.05.2025).
 16. Hoover E.M. *Location of Economic Activity*. New York; Toronto; London: McGraw-Hill, 1948:120.
 17. Animitsa E.G. Methodological principles of urban agglomerations research. *Razmeshchenie proizvoditel'nykh sil Urala: sb. nauch. tr. Vyp. 9 = The location of the productive forces of the Urals : collection of scientific papers. Issue 9*. Sverdlovsk, 1974. (In Russ.)
 18. Lappo G.M. *Razvitie gorodskikh aglomeratsiy v SSSR = Development of urban agglomerations in the USSR*. Moscow: Nauka, 1978. (In Russ.)
 19. Lavrinenko P.A., Mikhaylova T.N., Romashina A.A., Chistyakov P.A. Agglomeration effects as a tool for regional development. *Problemy prognozirovaniya = Forecasting problems*. 2019;(3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/aglomeratsionnye-effekty-kak-instrument-regionalnogo-razvitiya> (accessed 20.05.2025).
 20. Baranskiy N.N. *Ekonomicheskaya geografiya SSSR = Economic geography of the USSR*. Moscow, 1949. (In Russ.)
 21. Zubarevich N.V. *Regiony Rossii: neravenstvo, krizis, modernizatsiya = Regions of Russia: inequality, crisis, modernization*. Moscow: Nezavisimyy institut sotsial'noy politiki, 2010:160. (In Russ.)
 22. Kolosovskiy N.N. *Teoriya ekonomicheskogo rayonirovaniya = Theory of economic zoning*. Moscow: Mysl', 1997:35. (In Russ.)
 23. Kolyasnikov V.A. Development of the concept of "Urban agglomeration". *Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN = Academic Bulletin of UralNIiproekt RAASN*. 2015;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-ponyatiya-gorodskaya-aglomeratsiya> (accessed 20.05.2025).
 24. *Giprogor*. Available at: <https://giprogor.ru/obinstitute#Aboutthecompany> (accessed 20.05.2025).
 25. Fujita M., Krugman P., Venables A.J. *The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade*. Cambridge, MA: MIT Press, 1999.
 26. Perroux F. *L'économie du XXe siècle*. Paris: Presses universitaires de France, 1961:346.
 27. Christaller W. *Die zentralen Orte in Süddeutschland*. Jena: Gustav Fischer, 1933:331.
 28. Alonso W. *Location and Land Use. Towards a General Theory of Land Rent*. Cambridge, Massachusetts, 1964:204.
 29. Naumov I.V., Sedel'nikov V.M., Averina L.M. The evolution of spatial development theories: fundamental features and current research objectives. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii = Journal of Economic Theory*. 2020;17(2):383–398. (In Russ.)
 30. Porter M. *Mezhdunarodnaya konkurentsia = International competition*. Moscow: Mezhdunarodnye otnosheniya, 1993:378. (In Russ.)
 31. Gamidullaeva L.A., Grosheva E.S. An Ecosystem Approach to Balanced Territorial Development. *Administrative consulting*. 2024;(1):144–162. doi: 10.22394/1726-1139-2024-1-144-162
 32. Gamidullaeva L.A. The industrial cluster of the region as a localized ecosystem: the role of factors of self-organization and collaboration. *π-Economy*. 2023;16(1):62–82. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.16105
 33. Gamidullaeva L.A., Strakhov E.P. The evolution of the cluster development concept: from agglomeration theory to eco-systems. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie) = THE WORLD (Modernization. Innovation. Development)*. 2023;14(1):106–125. (In Russ.). doi: 10.18184/2079-4665.2023.14.1.106-125

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Васильевна Макришина

старший преподаватель кафедры
менеджмента и государственного
управления,

Пензенский государственный
университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tavpnz@mail.ru

Maria V. Makrishina

Senior lecturer of the sub-department of
management and public administration,
Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Лейла Айваровна Гамидуллаева

доктор экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой менеджмента
и государственного управления,

Пензенский государственный
университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: gamidullaeva@gmail.com

Leyla A. Gamidullaeva

Doctor of economical sciences,
associate professor, head of the sub-
department of management and public
administration,

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 29.05.2025

Поступила после рецензирования/Revised 07.06.2025

Принята к публикации/Accepted 10.06.2025

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДИКТИВНОГО ЭКСПЕРТИРОВАНИЯ В РАМКАХ ОТРАСЛЕВОГО ФОРСАЙТ-СТРАТЕГИРОВАНИЯ

О. В. Ленкова

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
olga_lenkova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обосновывается актуальность отраслевого форсайт-стратегирования для одного из ключевых секторов отечественной экономики – нефтегазового комплекса России. Указываются проблемы в реализации предиктивного видения, такие как высокая степень инерционности и сложности рассматриваемого объекта, недостаточность теоретико-методического инструментария для формирования отраслевых прогностических параметров. Приводится важность использования экспертных опросов при реализации стратегических форсайт-сессий. В качестве цели проводимого исследования был определен поиск доказательной основы для выбора вектора стратегического развития отечественного нефтегазового комплекса и подтверждение наличия инерционности мышления экспертов. *Материалы и методы.* Исследование проводилось на основе использования технологической платформы Google-формы посредством размещения авторского опроса «Будущее российского нефтегазового комплекса» и получения ответов от респондентов, в роли которых выступили сотрудники отраслевых компаний, а также представители научно-образовательных организаций и учреждений. При обработке результатов опроса были задействованы методы обобщения, анализа и синтеза. *Результаты.* В результате проведенного исследования получены структурированные ответы на ключевые вопросы о перспективах и возможностях развития нефтегазового комплекса, касающиеся горизонта его существования, причин наличия кризиса и возможной стагнации, роли в реализации повестки устойчивого развития. *Выводы.* Полученные результаты могут быть использованы в качестве аргументированных конституирующих обоснований при разработке отраслевых стратегических документов и служить основой для дальнейшего развития теоретико-методологических основ стратегирования в нефтегазовом комплексе. Выполненный анализ реализации принципов защиты окружающей среды и устойчивого развития в России показал, что сформулированные в стратегии ООН принципы имеют практическое применение, в том числе и во внедрении инновационных технологий.

Ключевые слова: экспертный опрос, нефтегазовый комплекс, стратегия, перспективы, будущее, форсайт

Для цитирования: Ленкова О. В. Реализация предиктивного экспертирования в рамках отраслевого форсайт-стратегирования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 22–35. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-2

IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE EXPERTISE WITHIN INDUSTRY FORESIGHT STRATEGY

O.V. Lenkova

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
olga_lenkova@mail.ru

Abstract. *Background.* The article substantiates the relevance of industry foresight strategizing for the oil and gas complex of Russia, as for one of the key sectors of the domestic economy. Problems in the implementation of predictive vision are indicated, such as a high degree of inertia and complexity of the object under consideration, and the insufficiency of theoretical and methodological tools for the formation of predictive parameters. The importance of using expert surveys when implementing strategic foresight sessions is discussed. The author saw the purpose of the research as searching for an evidentiary basis for choosing the vector of strategic development of the domestic oil and gas complex and confirming the presence of inertia in the thinking of experts. *Materials and methods.* The study was carried out using the Google Forms technology platform by posting on this platform the author's survey "The Future of the Russian Oil and Gas Complex" and receiving responses from respondents, who were employees of industry companies, as well as representatives of scientific and educational organizations and institutions. *Results.* As a result of the study, structured answers were obtained to key questions about the prospects and opportunities for the development of the oil and gas complex, regarding the horizon of its existence, the reasons for the crisis and possible stagnation, and the role in the implementation of the sustainable development agenda. *Conclusions.* The results obtained can be used as reasoned constituent justifications in the development of industry strategic documents and serve as the basis for further development of the theoretical and methodological foundations of strategizing in the oil and gas complex.

Keywords: expert survey, oil and gas complex, strategy, prospects, future, foresight

For citation: Lenkova O.V. Implementation of predictive expertise within industry foresight strategy. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(2):22–35. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-2

Введение

В настоящее время нефтегазовый комплекс (НГК) России – это не только одна из фундаментальных отраслей экономики, обеспечивающая значительную долю поступлений в федеральный бюджет, но и важный инструмент на политической арене [1]. Энергетические ресурсы являются доминирующим аргументом в формировании международной политики разных стран. При этом внутри комплекса назрел целый пул серьезных проблем, связанных с истощением крупных месторождений, ухудшением структуры запасов и качества целевой продукции, удаленностью и инфраструктурной неразвитостью новых нефтегазоносных провинций [2]. Внутренние проблемы комплекса усугубляются под влиянием внешних неблагоприятных детерминант в виде нарастания санкционного давления, усиления климатической повестки, актуализации поисков более эффективных и экологических видов энергоресурсов [3]. Все это актуализирует необходимость принятия стратегических решений для выработки

вектора дальнейшего развития отечественного НГК, предусматривающих возможные кардинальные меры, которые необходимо реализовывать безотлагательно.

Для решения обозначенной проблемы требуются парадигмальная трансформация концептуально-методических основ стратегирования [4] и генерация на сформированном конструкте комплекса методического инструментария для поиска и обоснования небанальных стратегических рекомендаций. Для этого автором разработан подход, предполагающий стратификацию отраслевого стратегирования на форсайт-стратегирование (для выработки направлений дальнейшего, преимущественно долгосрочного, развития) и квантовое стратегирование (реализуемое в рамках форсайт-стратегирования, более краткосрочное, относимое к стратегиям не развития, а функционирования).

Вместе с тем, памятуя о сложности объекта управления и ключевых принципах стратегирования – своевременности и обоснованности, в качестве одного из ключевых приемов в стратегическом управлении с позиции авторской логики следует рассматривать экспертирование (использование экспертных оценок). При этом экспертные оценки могут применяться на разных этапах стратегирования. В частности, в данной работе для целей поиска доказательной основы при выборе вектора стратегического развития отечественного нефтегазового комплекса целесообразным предлагается использование экспертного опроса.

Очевидно, что для реализации обозначенной цели экспертирование должно носить преимущественно предиктивный характер, т.е. содержать мнения авторитетных и компетентных респондентов относительно будущих изменений и перспективных стратегических направлений, предполагаемых к осуществлению в отраслевом контуре.

Материалы и методы

Исследование проводилось на основе использования технологической платформы Google-формы посредством размещения авторского опроса «Будущее российского нефтегазового комплекса». Для этого были сформулированы 10 вопросов, которые предназначались для получения мнения экспертов относительно перспектив развития НГК. В опросе принял участие 121 эксперт.

Для участия в исследовании приглашались преимущественно специалисты и ученые, деятельность которых осуществляется в периметре отечественного НГК, включая его инфраструктуру. Респондентами выступили сотрудники таких компаний, как ПАО НК «Роснефть», ПАО «Транснефть», ПАО «Газпром», ПАО «Новатэк», ПАО «Лукойл». Откликнулись на приглашение и ответили на вопросы ученые из научно-образовательных профильных учреждений (Тюменский индустриальный университет, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина), а также отраслевых научных, исследовательских и проектных институтов (ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», ООО «Тюменский нефтяной научный центр» и др.). «Портрет» эксперта, принявшего участие в данном исследовании, можно увидеть на рис. 1.



Рис. 1. Характеристика респондентов, участвующих в опросе «Будущее российского нефтегазового комплекса»

В качестве экспертов было также предложено выступить специалистам и ученым, которые уже завершили трудовую деятельность в силу своего возраста, но остаются авторитетными персонами, реализуя свой потенциал через участие в работе в диссертационных советах, в различных комиссиях при министерствах и ведомствах (страта «не работаю» в диаграмме «Место работы респондентов»). Однако, несмотря на наличие в составе экспертов лиц пенсионного возраста, основная часть респондентов представляла собой людей средних лет (25–60 лет). Более одной третьей части респондентов имели ученую степень доктора или кандидата наук. Приблизительно треть респондентов занимала руководящие должности разных уровней в отраслевых организациях и учреждениях. При этом имели акции компаний нефтегазового профиля, т.е. выступали в качестве (со)собственников данного бизнеса, около 18 % опрошенных.

Результаты и обсуждение

В ходе опроса эксперты ответили на разные, иногда провокационные, вопросы. Так, на вопрос о том, существуют ли у нефтегазового комплекса долгосрочные перспективы, 93,4 % респондентов ответили утвердительно (рис. 2).

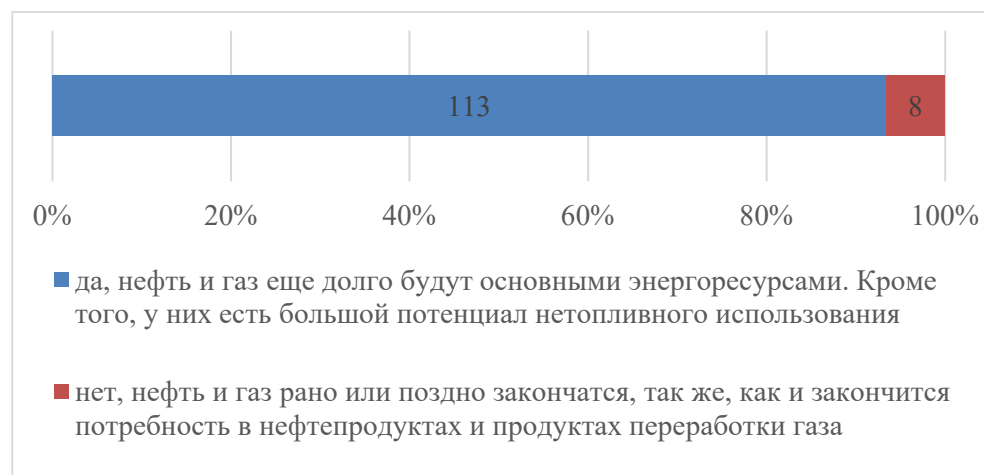


Рис. 2. Структура ответов респондентов на вопрос «Считаете ли Вы, что у нефтегазового комплекса есть долгосрочные перспективы?»

Полученное распределение ответов на данный вопрос демонстрирует серьезную уверенность экспертов в перспективности отрасли. Однако это может быть связано с тем, что утвердительная формулировка предлагаемого варианта ответа отсылает к возможности нетопливного использования энергоресурсов. Кроме того, положительный ответ был неоднозначен, так как восемь человек, как оказалось, придерживаются мнения о конечности углеводородного преобладания в структуре энергопотребления.

В продолжении исследования автор выяснял ответы на вопрос об отношении к истощаемости запасов углеводородного сырья (рис. 3), так как одним из основных сдерживающих развитие отрасли факторов является именно концепция невозобновляемости и истощаемости запасов нефти и газа.

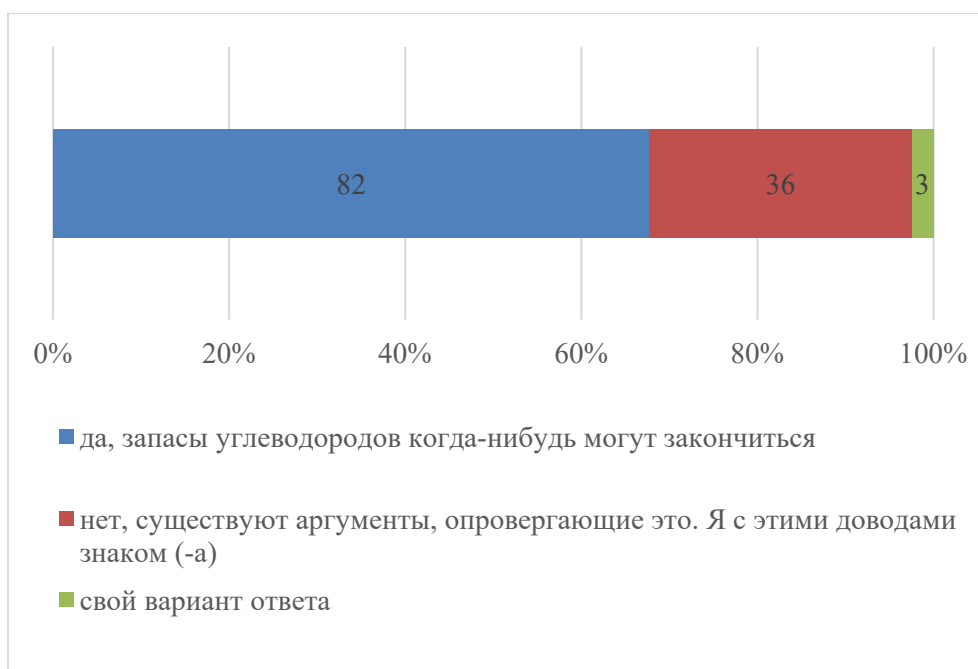


Рис. 3. Структура ответов респондентов на вопрос «Согласны ли Вы с мнением о том, что запасы углеводородов (нефти и газа) исчерпаемы и невозобновляемы?»

Почти 68 % опрошенных согласились с тем, что запасы исчерпаемы и невозобновляемы. Однако около 30 % респондентов однозначно эту концепцию отвергли, три человека высказали свою точку зрения. Их ответы носили условно-промежуточный характер, так как они содержали следующее:

- описание сложности дальнейшего «формирования» запасов углеводородов в связи с негативным влиянием антропогенного фактора и снижением положительного влияния естественных природных условий на алгоритмы формирования залежей;

- обоснование необходимости правильной организации добычи для «продления жизни» каждого месторождения;

- сомнения в исчерпаемости запасов и предположение о том, что запасы в перспективе перейдут в разряд «трудноизвлекаемые», что обусловит соответствующую постановку задачи перед отраслью.

При этом в контексте проводимого исследования нельзя не вспомнить знаменитое выражение бывшего министра нефтяной промышленности Саудовской Аравии, шейха Ахмеду Заки Ямани: «Каменный век закончился не потому, что кончились камни. Так и нефтяной век закончится не потому, что кончится нефть» [5]. Результаты, полученные в ходе проведения опроса, в совокупности с данным рассуждением могут выступать основанием для формулирования аргументации в пользу необходимости будущей диверсификации и удлинения отраслевых цепочек создания ценности (углубление переработки, развитие нефтехимических производств).

На вопрос о возможном горизонте времени, за которым предположительно потеря актуальности углеводородами, ответы были различными (рис. 4).



Рис. 4. Структура ответов респондентов на вопрос «Как Вы считаете, когда нефть и газ потеряют свою актуальность в качестве энергоресурсов?»

Половина экспертов продемонстрировали уверенность в том, что углеводородная основа энергетики потеряет свою актуальность в ближайшей перспективе, оставшаяся половина указала на возможность деактуализации углеводородной повестки в энергетике гораздо позже. При этом семь человек дали еще более оптимистические прогнозные оценки, указав, что нефть и газ будут востребованы еще как минимум 200 лет и дольше. Примечательно, что структура ответов на данный вопрос вступает в некоторое противоречие с ответами на первый вопрос о перспективности нефти и газа. Можно предположить, что соотнесение понятия «перспективы» с временной шкалой является весьма субъективным для различных опрашиваемых лиц. Кроме того, это может служить доказательством высказанного ранее авторского предположения о том, что, отвечая на вопрос о перспективности НГК в будущем, респонденты в большей степени ориентировались на указание нетопливного развития данного сектора отечественной экономики.

Мнения относительно того, смогут ли возобновляемые источники энергии (ВИЭ) полностью заместить нефть и газ, разделились практически поровну между ответами «возможно, в отдаленной перспективе» и «нет, не смогут», не подтвердив тем самым статус наиболее существенной угрозы со стороны растущего интереса к ВИЭ для традиционных энергоресурсов (рис. 5).



Рис. 5. Структура ответов респондентов на вопрос «Смогут ли, по Вашему мнению, возобновляемые источники энергии (ветер, солнце и пр.) полностью заменить невозобновляемые (нефть и газ)?»

При этом четыре человека согласились с тем, что уже в ближайшем будущем произойдет кардинальная смена энергетического базиса в глобальном масштабе, а еще один человек высказал свое мнение, согласно которому уже в настоящее время необходимо сделать ставку на атомную энергетику. Но доля данных экспертов в совокупной выборке крайне мала.

В продолжении исследования респондентам было предложено выбрать из списка возможных причин две наиболее значимые, по которым может произойти отказ от использования нефтегазовых ресурсов в качестве энергоносителей (рис. 6).

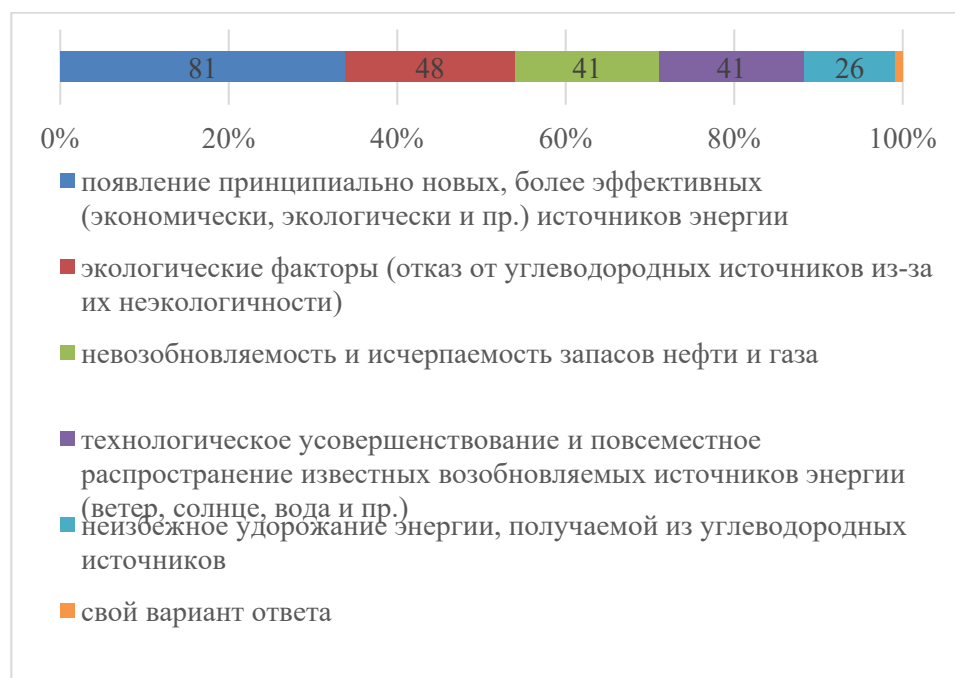


Рис. 6. Структура ответов респондентов на вопрос «Отметьте, пожалуйста, ДВЕ наиболее значимые, на Ваш взгляд, причины потери актуальности и отказа от нефти и газа в качестве энергоносителей»

Большинство опрошенных указало в качестве ключевой причины появление новых источников энергии. Это подтверждает наличие ключевой угрозы – возможность появления принципиально нового (новых) источника энергии, который будет качественно лучше существующих углеводородных. Одной из перспективнейших на сегодня можно считать термоядерную энергетику [6, 7]. Технологии термоядерного синтеза пока еще не готовы к массовому использованию, но ими активно занимаются государственные и частные компании в разных странах мира, а также проявляют интерес и нефтегазовые корпорации.

Относительно небольшое количество голосов в пользу причины, связанной с неизбежным удорожанием углеводородной энергии, можно объяснить неэластичностью спроса по цене на энергетические ресурсы и значительные расходы (а следовательно, и цены) на альтернативные источники, требующие государственной поддержки в форме субсидирования на начальных этапах запуска соответствующих проектов. Одинаково невысокое количество ответов, где в качестве причин указываются невозобновляемость (и истощаемость)

и появление/наличие ВИЭ, верифицирует ответы респондентов на предыдущие вопросы.

Интересно, что только 2 человека из опрашиваемых воспользовались возможностью дать свой вариант ответа и прокомментировали точку зрения о том, что нефть и газ никогда не потеряют актуальность, а складывающиеся внешние условия (в частности, провозглашение и реализация концепции «зеленой экономики» [8, 9]) – это в большей степени макрополитические влияния.

Вариант ответа, объясняющий отказ от нефти и газа по экологическим причинам, занял второе место среди всех возможных. Однако на вопрос о значительности вклада нефтегазового комплекса в формирование углеродного следа (рис. 7) утвердительно ответили только 20 % опрошенных. Остальное большинство респондентов согласилось с тем, что не сам НГК является причиной выбросов, а отрасли, использующие углеводороды в качестве энергоресурсов, а также те, кто генерирует парниковый эффект неэнергетического происхождения (ЖКХ, животноводство и т.п.).

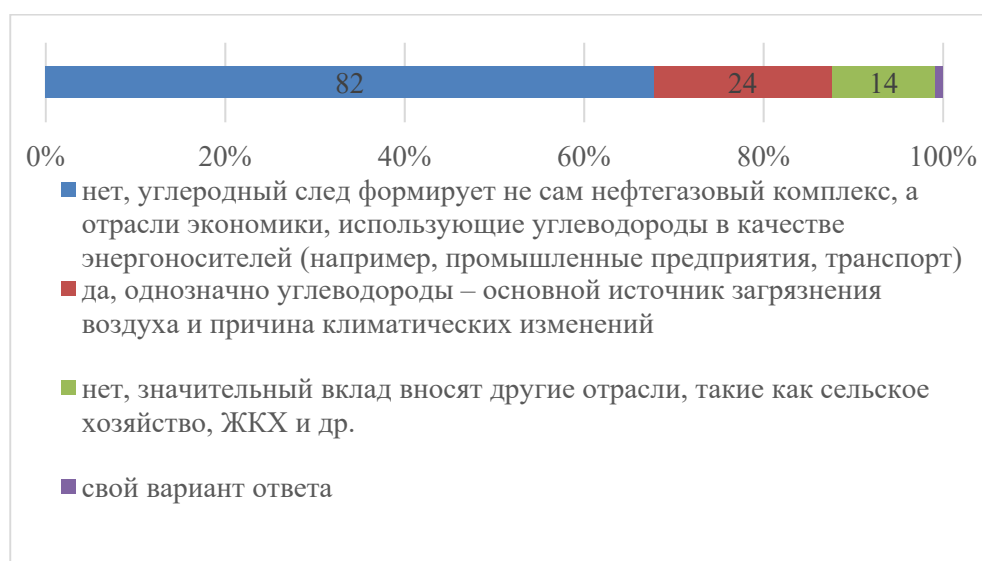


Рис. 7. Структура ответов респондентов на вопрос «Согласны ли Вы с тем, что нефтегазовый комплекс вносит самый значительный вклад в формирование углеродного следа (выбросы CO₂, парниковый эффект)?»

Полученные ответы дают основание в качестве одного из стратегических направлений нивелирования указанной угрозы (ужесточение экологических требований) рассматривать разработку комплекса мер по минимизации и/или улавливанию и переработке двуокси углерода в различных отраслях и сферах деятельности. Это доказывает необходимость межотраслевой конвергенции стратегирования и возможность формирования методологии метаотраслевого стратегирования для реализации целей более высокого (национального, глобального) уровня с декомпозицией их не только по регионам, но отраслям российской экономики.

Для получения экспертного подтверждения мнения о необходимости развития секторов нефтегазохимии и переработки опрашиваемым был задан соответствующий вопрос (рис. 8).

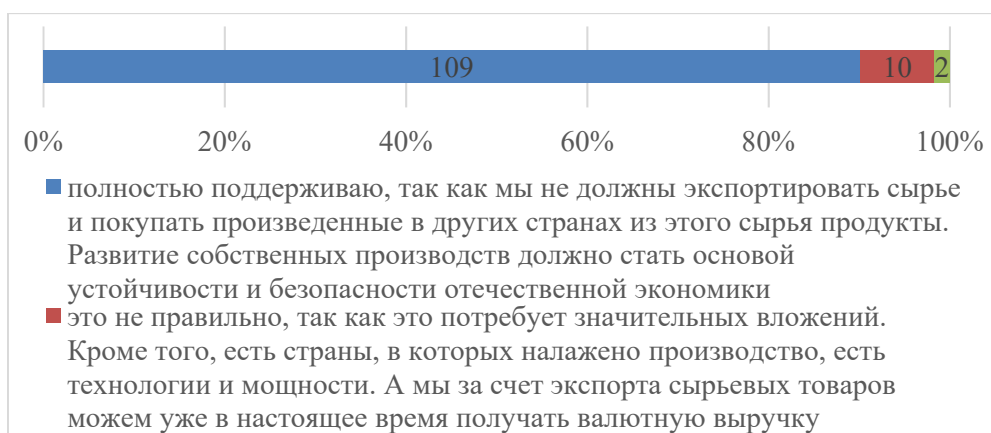


Рис. 8. Структура ответов респондентов на вопрос «Как Вы относитесь к перспективе ускоренного развития перерабатывающих и нефтегазохимических производств (производств высокой добавленной стоимости) на территории России?»

В результате опроса только 10 человек не согласились с предложенным утверждением, а два респондента пояснили свое мнение тем, что развитие должно идти сбалансированно и важно оценивать продуктовые возможности и технологическое обеспечение отрасли для принятия подобного решения. Эти рассуждения дают основание полагать, что в развитии исследования целесообразно задействовать инструментарий теории изменений и жизненных циклов [10] для иллюстрации наличия «вложенности» циклов более мелких систем (продуктов) в циклы более крупных систем (отрасли).

Несмотря на отсутствие эластичности спроса по цене (точнее коэффициент эластичности близок к единице) и бесспорной конкурентоспособности по цене углеводородных энергоносителей российского производства по сравнению с альтернативными вариантами, экспертам было предложено поучаствовать в ранжировании причин повышения стоимости углеводородов в перспективе (рис. 9).

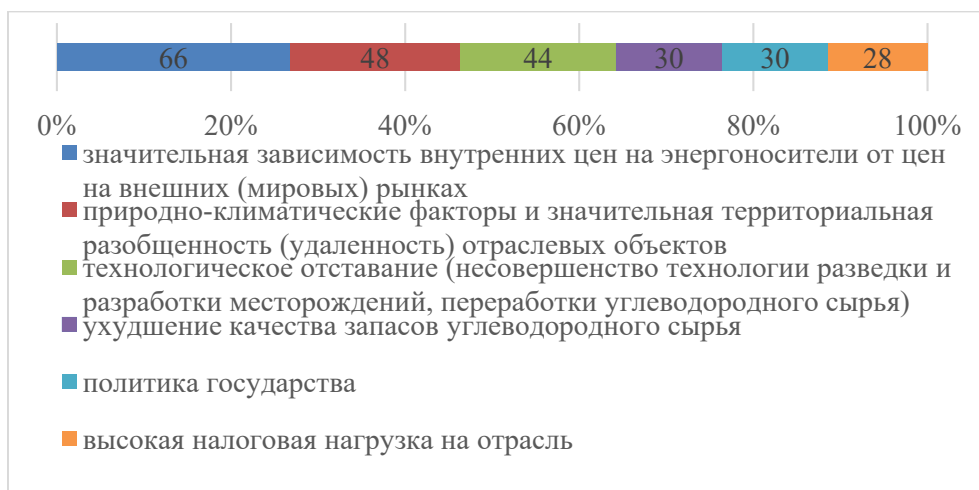


Рис. 9. Структура ответов респондентов на вопрос «Выберите ДВЕ наиболее значимые, на Ваш взгляд, причины увеличения стоимости углеводородных энергоносителей в России»

Значительное преобладание в ответах получил вариант, объясняющий рост цен на энергоносители их зависимостью от волатильности цен на внешних рынках. Нужно заметить, что вопрос стоимости энергоносителей крайне непросто. При регулировании деятельности нефтегазовых компаний происходит «перекладывание средств из одного кармана в другой». Государство получает налоги с компаний-недропользователей, а потом этим же компаниям компенсирует разницу в ценах на внешнем и внутреннем рынках через демпфирование для обеспечения внутреннего спроса на нефтепродукты, что вызывает определенные вопросы и служит основанием для разработки стратегических рекомендаций по организационным трансформациям в этой области. Для выяснения отношения экспертов к возможности кардинальных организационных преобразований им был задан вопрос о том, как они относятся к национализации НГК (рис. 10).



Рис. 10. Структура ответов респондентов на вопрос «Как Вы относитесь к возможности национализации нефтегазового комплекса?»

Интересно, что только 25 % опрошенных дали отрицательный ответ, около 64 % респондентов ответили утвердительно, а 10 человек не смогли ответить однозначно, но допустили такую возможность, хотя многие из них указали на негативные последствия национализации отрасли.

В завершении опроса респондентам было предложено ответить на необычный вопрос, касающийся нетопливного использования нефти.

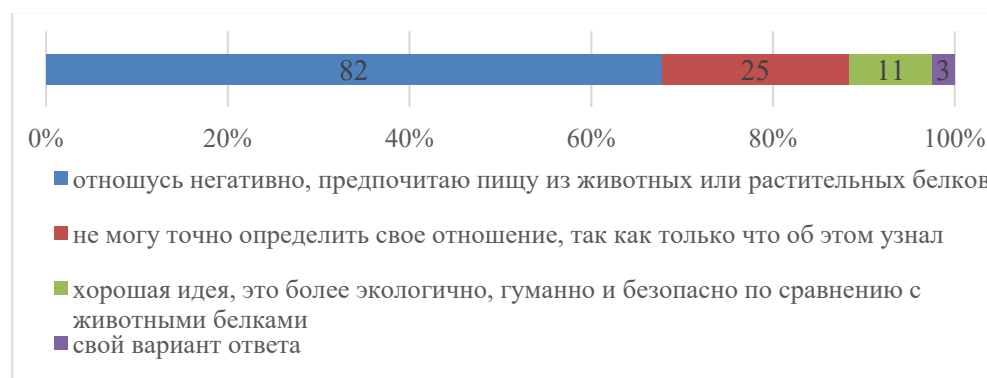


Рис. 11. Структура ответов респондентов на вопрос «У нефти и газа есть множество вариантов нетопливного использования. Один из них заключается в возможности их применения в пищевой отрасли. В связи с этим интересно Ваше отношение к еде, в которой будет содержаться искусственный белок, произведенный из нефти или газа. Выберите утверждение, наиболее точно описывающее Ваше отношение к такой еде»

Почти 68 % опрошенных выбрали ответ, предполагающий отказ от синтезированной пищи, 23,2 % не смогли определить свое отношение и только 9,1 % людей согласились с тем, что это хорошая идея. Вместе с тем технологии производства еды из углеводородного сырья в нашей стране известны давно [11] и они могли бы стать реализованными в рамках стратегии диверсификации отраслевого продуктового портфеля. Кроме того, производство синтезированной пищи могло бы решить некоторые глобальные проблемы человечества, к тому же оно полностью соответствует принципам современной концепции устойчивого развития. В любом случае структура полученных ответов позволяет сформулировать предположение о наличии инерционности/консервативности мышления даже у отраслевых экспертов в отношении базовых потребностей. Это продуцирует идею о том, что для реализации подобных нетривиальных стратегических решений необходимы очень весомая аргументация и серьезный комплекс сопровождающих и поддерживающих функциональных стратегий и организационных инициатив [12].

Заключение

В ходе проведенного исследования от экспертов, являющихся учеными или специалистами-практиками в рассматриваемой отрасли, получены структурированные ответы на вопросы, касающиеся перспектив развития отечественного нефтегазового комплекса. В частности, подтверждение нашли предположения автора о перспективности и долгосрочной актуальности комплекса в периметре национальной экономики, а также отсутствия серьезной конкуренции между традиционными и альтернативными источниками энергии. Проведено экспертное ранжирование возможных причин утраты актуальности нефтегазовыми ресурсами в качестве энергоносителей и их удорожания. Определено отношение экспертов к вопросам национализации отрасли и расширения спектра нетопливного использования углеводородных ресурсов. В результате размышлений над данными экспертного опроса сформулированы предпосылки формирования форсайт-образа НГК в будущем, сделаны важные выводы о повышении степени реализуемости стратегических инициатив нетривиального характера.

Список литературы

1. Малахов В. А., Несытых К. В. О роли топливно-энергетического комплекса в экономике России // Проблемы прогнозирования. 2016. № 5 (158). С. 59–69.
2. Крюков В. А., Крюков Я. В., Маркова В. М. [и др.]. Проблемы развития топливно-энергетического комплекса // Новый импульс Азиатской России: источники и средства развития : монография : в 2 т. Новосибирск : Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 2023. Т. 2. С. 8–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46197188> (дата обращения: 01.09.2024).
3. Гамидуллаева Л. А., Шуструйский А. В. Стратегирование устойчивого развития промышленных предприятий для обеспечения технологического суверенитета в топливно-энергетическом комплексе // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 2. С. 35–49. doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-3
4. Баянов К. Р., Павлова Н. П. Прогнозные модели образа будущего в концепциях общественного развития // Kant. 2018. № 4 (29). С. 114–118.
5. Готсдакер А. Каменный и нефтяной век. Арье Готсданкер – о религии будущего // Радио Свобода. 25.02.2020. URL: <https://www.svoboda.org/a/30428883.html> (дата обращения: 15.11.2024).

6. Madsen M. Термоядерная энергетика появится тогда, когда она станет действительно необходима человечеству // Вестник МАГАТЭ. 2021. № 5. С. 62. URL: <https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sinteza/termoyadernaya-energetika-poyavitsya-togda-kogda-ona-stanet-deystvitelno-neobhodima-chelovechestvu> (дата обращения: 20.11.2024).
7. Ильгисонис В. Термоядерные исследования как существенная составляющая технологической платформы энергетической безопасности // Энергетическая политика. 2023. № 2 (180). С. 12–31. doi: 10.46920/2409-5516_2023_2180_12
8. Ануфриев В. П., Гудим Ю. В., Каминов А. А. Устойчивое развитие. Энергоэффективность. Зеленая экономика : монография М. : ИНФРА-М, 2022. 201 с.
9. Бушуев В., Шафраник Ю. Политические решения и опасное ускорение волатильности мирового энергоэкономического развития // Энергетическая политика. 2024. № 5 (196). С. 8–23. doi: 10.46920/2409-5516_2024_5196_8
10. Вечкасова М. В., Зубарев А. А., Шевченко С. Ю. Управление жизненным циклом продукции нефтегазохимических производств в условиях перехода к рациональным моделям потребления и производства // Вестник Академии знаний. 2023. № 3 (56). С. 53–56. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54262661_85146157.pdf (дата обращения: 20.12.2024).
11. Несмеянов А. Н. Ученый и человек: биография отдельного лица // Ученые СССР. Очерки, воспоминания, материалы / сост. М. А. Несмеянова ; отв. ред. М. И. Кабачник. М. : Наука, 1988. 424 с.
12. 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

References

1. Malakhov V.A., Nesytykh K.V. The role of the fuel and energy complex in the Russian economy. *Problemy prognozirovaniya = Forecasting problems*. 2016;(5):59–69. (In Russ.)
2. Kryukov V.A., Kryukov Ya.V., Markova V.M. et al. Problems of development of the fuel and energy complex. *Novyy impul's Aziatskoy Rossii: istochniki i sredstva razvitiya: monografiya: v 2 t. = The New impulse of Asian Russia: sources and means of development : monograph : in 2 volumes*. Novosibirsk: Institut ekonomiki i organizatsii promyshlennogo proizvodstva SO RAN, 2023;2:8–85. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46197188> (accessed 01.09.2024).
3. Gamidullaeva L.A., Shustruyskiy A.V. Strategizing the sustainable development of industrial enterprises to ensure technological sovereignty in the fuel and energy complex. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2024;(2):35–49. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-3
4. Bayanov K.R., Pavlova N.P. Predictive models of the image of the future in the concepts of social development. *Kant = Kant*. 2018;(4):114–118. (In Russ.)
5. Gotsdaker A. The Stone and Oil Age. Arie Gotsdanker – about the religion of the future. *Radio Svoboda = Radio Liberty*. 25.02.2020. (In Russ.). Available at: <https://www.svoboda.org/a/30428883.html> (accessed 15.11.2024).
6. Madsen M. Thermonuclear energy will appear when it becomes really necessary for humanity. *Vestnik MAGATE = Bulletin of the MAGATE*. 2021;(5):62. (In Russ.). Available at: <https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sinteza/termoyadernaya-energetika-poyavitsya-togda-kogda-ona-stanet-deystvitelno-neobhodima-chelovechestvu> (accessed 20.11.2024).
7. Il'gisonis V. Thermonuclear research as an essential component of the technological platform of energy security. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2023;(2):12–31. (In Russ.). doi: 10.46920/2409-5516_2023_2180_12

8. Anufriev V.P., Gudim Yu.V., Kaminov A.A. *Ustoychivoe razvitie. Energoeffektivnost'. Zelenaya ekonomika: monografiya = Sustainable development. Energy efficiency. Green Economy : a monograph*. Moscow: INFRA-M, 2022:201. (In Russ.)
9. Bushuev V., Shafranik Yu. Political decisions and the dangerous acceleration of global energy and economic development volatility. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2024;(5):8–23. (In Russ.). doi: 10.46920/2409-5516_2024_5196_8
10. Vechkasova M.V., Zubarev A.A., Shevchenko S.Yu. Life cycle management of oil and gas chemical production products in the context of transition to rational consumption and production models. *Vestnik Akademii znaniy = Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023;(3):53–56. (In Russ.). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_54262661_85146157.pdf (accessed 20.12.2024).
11. Nesmeyanov A.N. Scientist and man: a biography of an individual. *Uchenye SSSR. Ocherki, vospominaniya, materialy = Scientists of the USSR. Essays, memoirs, materials*. Moscow: Nauka, 1988:424. (In Russ.)
12. Kulikova T.A., Balakhonova E.V. Foresight in managing the development of industrial enterprises. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2023;(2):42–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-3

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Викторовна Ленкова

кандидат экономических наук, доцент
кафедры менеджмента в отраслях
топливно-энергетического комплекса,
Тюменский индустриальный
университет
(Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38)
E-mail: olga_lenkova@mail.ru

Olga V. Lenkova

Candidate of economical sciences,
associate professor of the sub-department of
management in the fuel and energy complex,
Tyumen Industrial University
(38 Volodarskogo street, Tyumen, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 04.02.2025

Поступила после рецензирования/Revised 30.04.2025

Принята к публикации/Accepted 15.05.2025

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХОЗЯЙСТВУЮЩЕГО СУБЪЕКТА

С. С. Солдатова

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Нарастание внешнеполитической напряженности в мире и, как следствие, рост финансово-экономических угроз и санкций для российских товаропроизводителей диктуют повышенные требования к уровню обеспечения их экономической безопасности. Цифровизация экономического пространства привела к повышению востребованности на рынке информации как специфического товара. В данных условиях актуальность совершенствования методов и механизмов защиты конфиденциальной информации совершенно очевидна. Цель и задачи данного процесса сводятся к повышению уровня защищенности информационных ресурсов объекта от несанкционированного доступа и воздействия. *Материалы и методы.* В ходе выполненного научного исследования применялись общенаучные и экономико-статистические методы сбора и анализа информации по проблематике исследования, что позволило решить поставленные задачи. *Результаты.* Исследованы виды и типы конфиденциальной информации, которые наиболее часто подвержены хищению. Выявлены основные причины нарушений в сфере информационной безопасности, что позволило выработать рекомендации по совершенствованию работы службы экономической безопасности субъекта в сфере защиты конфиденциальной информации. Определены основные направления защиты информационных ресурсов хозяйствующего субъекта в целях повышения его экономической безопасности. *Выводы.* Предложены рекомендации по совершенствованию методов и механизмов защиты информационных ресурсов российских компаний от несанкционированного доступа и хищений на основе внедрения комплексного подхода к защите конфиденциальной информации от всех видов угроз.

Ключевые слова: конфиденциальная информация, информационные ресурсы, угрозы, информационная безопасность, экономическая безопасность

Для цитирования: Солдатова С. С. Методы защиты конфиденциальной информации в целях обеспечения экономической безопасности хозяйствующего субъекта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 36–46. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-3

METHODS OF PROTECTING CONFIDENTIAL INFORMATION IN ORDER TO ENSURE THE ECONOMIC SECURITY OF AN ECONOMIC ENTITY

S.S. Soldatova

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

Abstract. *Background.* The increase in foreign policy tensions in the world and, as a result, the growth of financial and economic threats and sanctions for Russian producers dictate increased requirements for the level of ensuring their economic security. The digitalization of the economic space has led to an increase in demand for information as a specific product on the market. In these circumstances, the relevance of improving methods and mechanisms for protecting confidential information is quite obvious. The purpose and objectives of this process are to increase the level of protection of the object's information resources from unauthorized access and exposure. *Materials and methods.* In the course of the performed scientific research, general scientific and economic-statistical methods of collecting and analyzing information on the problems of research were used, which made it possible to solve the tasks set. *Results.* The types and types of confidential information that are most often susceptible to theft are investigated. The main causes of violations in the field of information security have been identified, which made it possible to develop recommendations for improving the work of the economic security service of the subject in the field of confidential information protection. The main directions of protection of information resources of an economic entity in order to increase its economic security are determined. *Conclusions.* Recommendations are proposed to improve methods and mechanisms for protecting information resources of Russian companies from unauthorized access and theft, based on the introduction of an integrated approach to protecting confidential information from all types of threats.

Keywords: confidential information, information resources, threats, information security, economic security efficiency

For citation: Soldatova S.S. Methods of protecting confidential information in order to ensure the economic security of an economic entity. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):36–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-3

Введение

Для каждого хозяйствующего субъекта вопрос обеспечения собственной экономической безопасности в современных условиях, характеризующихся высокой степенью неопределенности внешней среды, нарастанием экономических угроз вследствие ужесточения экономических санкций и ограничений со стороны коллективного Запада относительно России, является жизненно важным. Ускорение темпов развития информационных технологий и цифровизация экономического пространства вывели на первый план именно информационную составляющую экономической безопасности хозяйствующего субъекта. Актуальность защиты безопасности информационных ресурсов на сегодняшний день является неоспоримой управленческой задачей, так как от

степени защищенности конфиденциальной бизнес-информации от несанкционированного доступа и утечки во многом зависят финансово-экономические результаты работы компании.

Информационная безопасность является одним из ключевых элементов системы обеспечения экономической безопасности объекта. К числу информационных ресурсов хозяйствующего субъекта принято относить: непосредственно информационные данные; аппаратные средства накопления и хранения информации; программное обеспечение, в том числе прикладные компьютерные программы; документы в бумажном виде [1].

Всем субъектам, осуществляющим производственно-коммерческую деятельность на территории Российской Федерации, согласно требованиям Федерального закона № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» [2], необходимо реализовать комплекс управленческих мер по трем основным направлениям:

- 1) защита информационных ресурсов от несанкционированного доступа, копирования, распространения, уничтожения информации и иных неправомерных действий с ней;
- 2) своевременное выявление и пресечение правонарушений в сфере информационной безопасности объекта;
- 3) мониторинг и контроль функционирования системы информационной безопасности объекта [3].

Понятие конфиденциальной информации используется не только в бизнес-сообществе, но и на государственном уровне. В условиях нарастания напряженности в геополитической и макроэкономической сферах защита подобного рода информации практически для любого субъекта экономической деятельности является первостепенной задачей.

Конфиденциальная информация – это информационные ресурсы и сведения, имеющие особую ценность для их владельца (личности, организации, органов власти, государства). От эффективности процесса защиты и сохранения целостности данной информации напрямую зависят экономический результат, конкурентоспособность и экономическая безопасность объекта (собственника информации) [4].

По своей сути конфиденциальная информация – это персональные сведения о сотрудниках компании, ее клиентах, партнерах, поставщиках и прочих контрагентах. К данному виду информации относятся технологии, сведения о финансовом, материально-техническом состоянии, бизнес-план и стратегия развития, в том числе стратегия создания и развития конкурентных преимуществ.

Материалы и методы

В процессе исследования теоретической базы, а также изучения практического опыта ряда промышленных предприятий Пензенской области были выявлены, систематизированы данные, характеризующие основные проблемы в сфере информационной безопасности.

В течение ряда последних лет количество противоправных действий, нацеленных на несанкционированный доступ к конфиденциальной информации, имеет устойчивую динамику к росту. По официальным данным, ежегодно объем утечки конфиденциальной информации увеличивается приблизительно на 30 % [5]. При этом если до 2022 г. хакеров в основном интересовал малый и средний бизнес, то в настоящее время объектом внимания злоумышленников

является крупный российский бизнес, в особенности компании и организации, функционирующие в сфере военно-промышленного комплекса (ВПК). Конечно, в современных условиях данный факт никого не удивляет. На долю предприятий ВПК приходится 20 % от всех преступлений в сфере информационной безопасности [6].

На рис. 1 представлен результат анализа официальных данных о несанкционированном доступе и утечке конфиденциальной информации промышленных российских предприятий, которые были выявлены в течение прошедшего года.

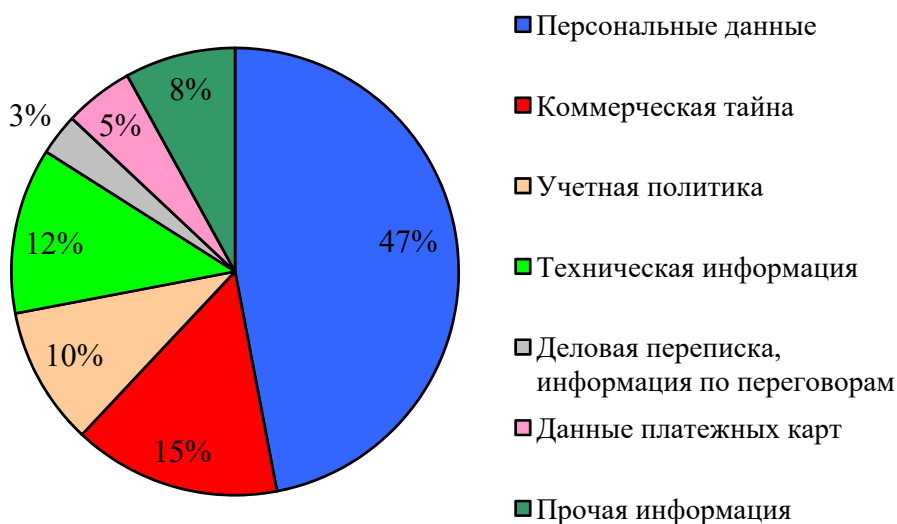


Рис. 1. Основные виды украденной конфиденциальной информации у промышленных предприятий [6]

В качестве основной причины нарушений в сфере информационной безопасности, повлекшей утечку конфиденциальной информации, выделяется человеческий фактор.

Ошибки, нарушения, недостаточный уровень профессиональной компетенции и должностная халатность – это первая группа причин, вследствие которых нарушается экономическая и информационная безопасность хозяйствующего субъекта. Экономические потери и ущерб, как результат некомпетентности сотрудников, причем прежде всего на руководящих должностях, может быть весьма ощутимым и привести к катастрофическим последствиям для компании.

Однако вероятность утечки конфиденциальной информации, составляющей коммерческую тайну бизнеса, вследствие противоправных действий сотрудников (или бывших сотрудников) компании значительно выше. Так, на долю нарушений информационной безопасности в результате преступной деятельности сотрудников компании, связанной с коррупцией, нарушением или превышением должностных обязанностей, приходится порядка 43 % от общего числа утечек информации. Для сравнения: утечки конфиденциальной информации вследствие несанкционированного проникновения в компьютерную систему занимают 18 %, а кража документов – 10 % от общего числа [7].

Таким образом, уровень защищенности конфиденциальной информации и обеспеченности информационной безопасности хозяйствующего субъекта в целом напрямую зависит от эффективности процесса разработки и реализации кадровой стратегии на предприятии.

В контексте сегодняшнего дня, когда на российский бизнес оказывается колоссальное давление извне, роль информационной составляющей процесса обеспечения экономической безопасности субъекта и национальной безопасности государства является решающей. Развитие информационных технологий, к сожалению, привело также и к развитию мошенничества в IT-сфере. Таким образом, при разработке и совершенствовании методов и средств обеспечения информационной безопасности организация сталкивается с массой проблем. Часть трудностей и проблем связаны с противостоянием внешнему воздействию на систему безопасности объекта, а большая часть – с преодолением внутренних разногласий и конфликтов, которые ведут к ухудшению рабочей обстановки и внутрикорпоративной культуры, ускорению текучести кадров.

Совершенствование процесса обеспечения информационной безопасности хозяйствующего субъекта и защиты конфиденциальной информации от несанкционированного доступа должно опираться на улучшение функционирования службы (подразделения) экономической безопасности предприятия (рис. 2), а также с учетом наиболее приоритетных направлений защиты информационных ресурсов (рис. 3).

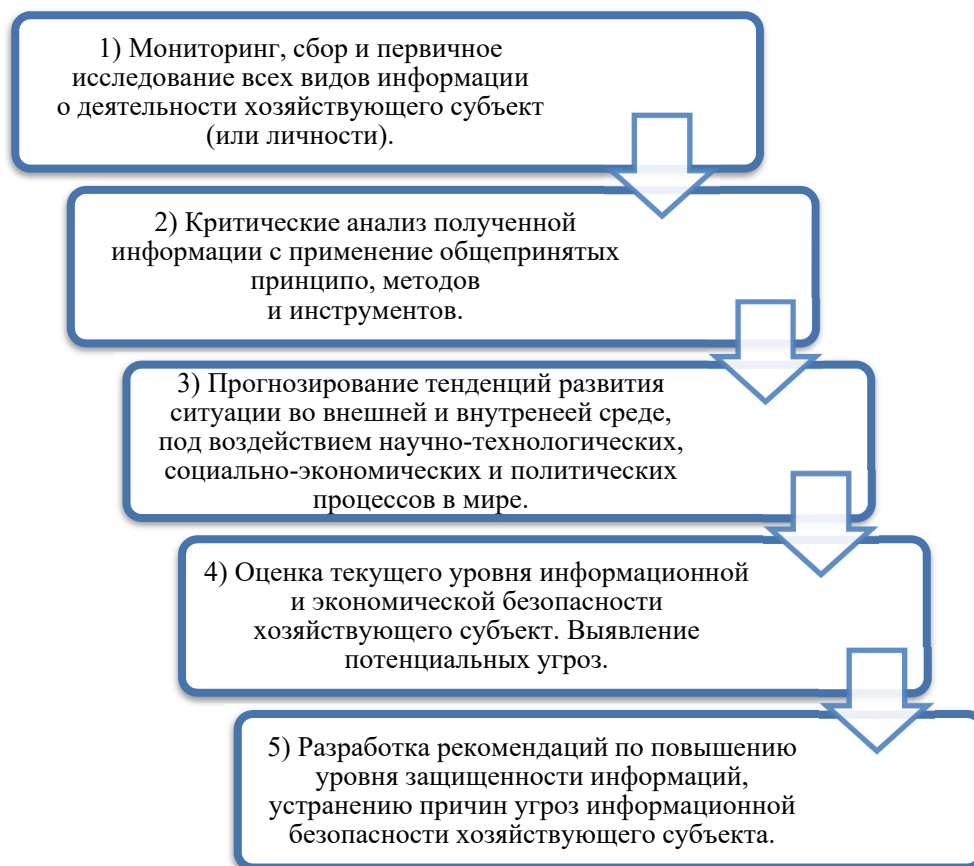


Рис. 2. Основные функции отдела экономической безопасности предприятия в сфере защиты информационных ресурсов

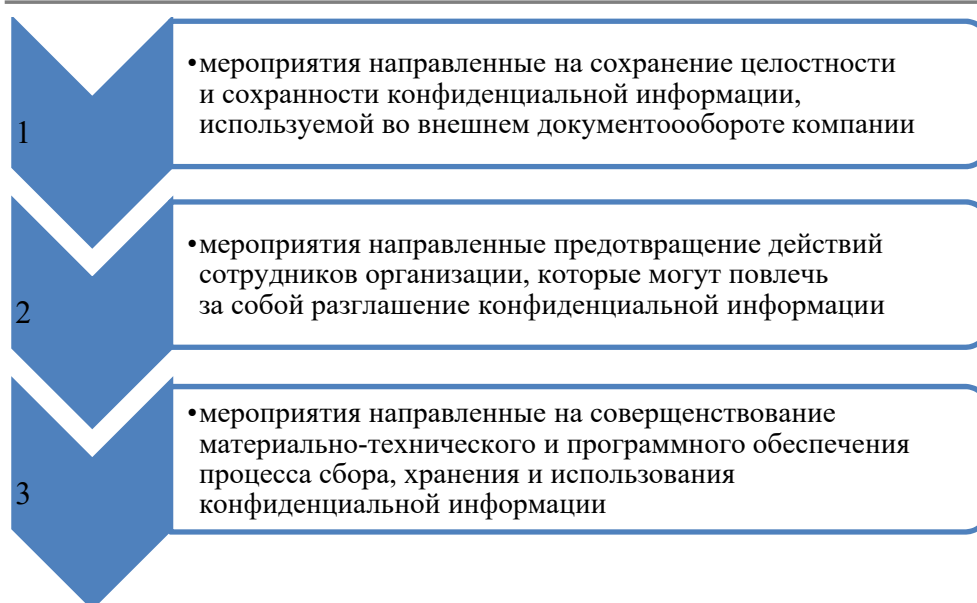


Рис. 3. Основные направления защиты информационных ресурсов хозяйствующего субъекта

Вопросы и проблемы, связанные с обеспечением информационной и экономической безопасности хозяйствующего субъекта, стоят на приоритетном месте среди управленческих задач. Динамика роста угроз безопасности отечественных производственных компаний за последние три года имеет негативный характер. Количество нарушений и преступлений в сфере информационной безопасности каждый год увеличивается. Так, за 2023 г. рост оценивается в 12 % относительно 2022 г., а за 2024 г. +24 % относительно прошлого периода [6].

Основным методом несанкционированного доступа к информационным ресурсам объекта на сегодняшний день является использование специальных вредоносных программ, на их долю приходится до 80 % от общего числа [8].

В качестве наиболее часто используемых источников хакерских атак выделяются интернет и методы удаленного подключения, что обусловлено не совсем рациональным и корректным расположением модемов сотовой связи [9]. На рис. 4 представлено распределение хакерских атак на информационные ресурсы организаций по механизмам их реализации.

Одним из наиболее часто используемых методов получения несанкционированного доступа к конфиденциальной информации является фишинговая атака, в результате которой сотрудник компании получает письмо, содержащее вредоносную программу. Результатом подобной атаки является установка на компьютер жертвы вредоносной (шпионской) программы, позволяющей манипулировать информацией. Чтобы максимально заинтересовать человека в данном письме, злоумышленники используют фишинговые сообщения следующих видов: сообщение от контрагентов (27 % от общего числа); от техподдержки (15 %); от государственных или контролирующих органов (13 %); актуальные новости и сообщения (10 %); сообщения от работодателя (9,5 %); сообщения на тему трудоустройства (7 %); развлекательный контент (3 %) [6].

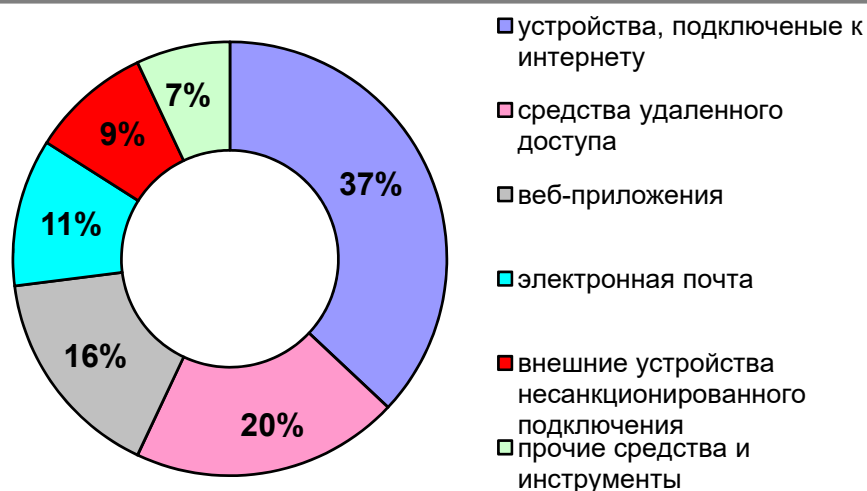


Рис. 4. Механизмы, используемые для реализации хакерских атак на информационные ресурсы организаций [9]

Обобщая вышеприведенные данные, можно сделать вывод, что в современных условиях хозяйствующему субъекту необходимо уделять пристальное внимание вопросам обеспечения защиты и безопасности собственной конфиденциальной информации. Данный процесс должен осуществляться на постоянной, непрерывной основе.

Результаты и обсуждение

Обеспечение информационной и экономической безопасности в целом требует от компании не только внимания, но и финансовых ресурсов. Приоритетность финансирования данной сферы деятельности должна определяться в зависимости:

- от текущей ситуации в бизнес-среде и наличия потенциальных угроз для хозяйствующего субъекта;
- от финансовых возможностей самой организации, уровня ее финансовой устойчивости и стратегии распределения затрат.

Разработку и применение методов и средств защиты конфиденциальной информации рекомендуется осуществлять на основе результатов подробного анализа динамики изменения показателей, характеризующих информационную безопасность объекта:

- коэффициент защищенности конфиденциальной информации;
- коэффициент информационной вооруженности;
- производительность информации [9].

При этом необходимо учитывать, что информационная и экономическая безопасности хозяйствующего субъекта представляют собой целый комплекс организационно-технических, финансово-экономических и управленческих показателей и критериев. В связи с этим совершенствование методов, механизмов и инструментов защиты информационных ресурсов в целях повышения уровня безопасности объекта – это задача многогранная, требующая комплексного подхода, ориентированного на непрерывное, планомерное развитие всей материально-технической базы предприятия (рис. 5).

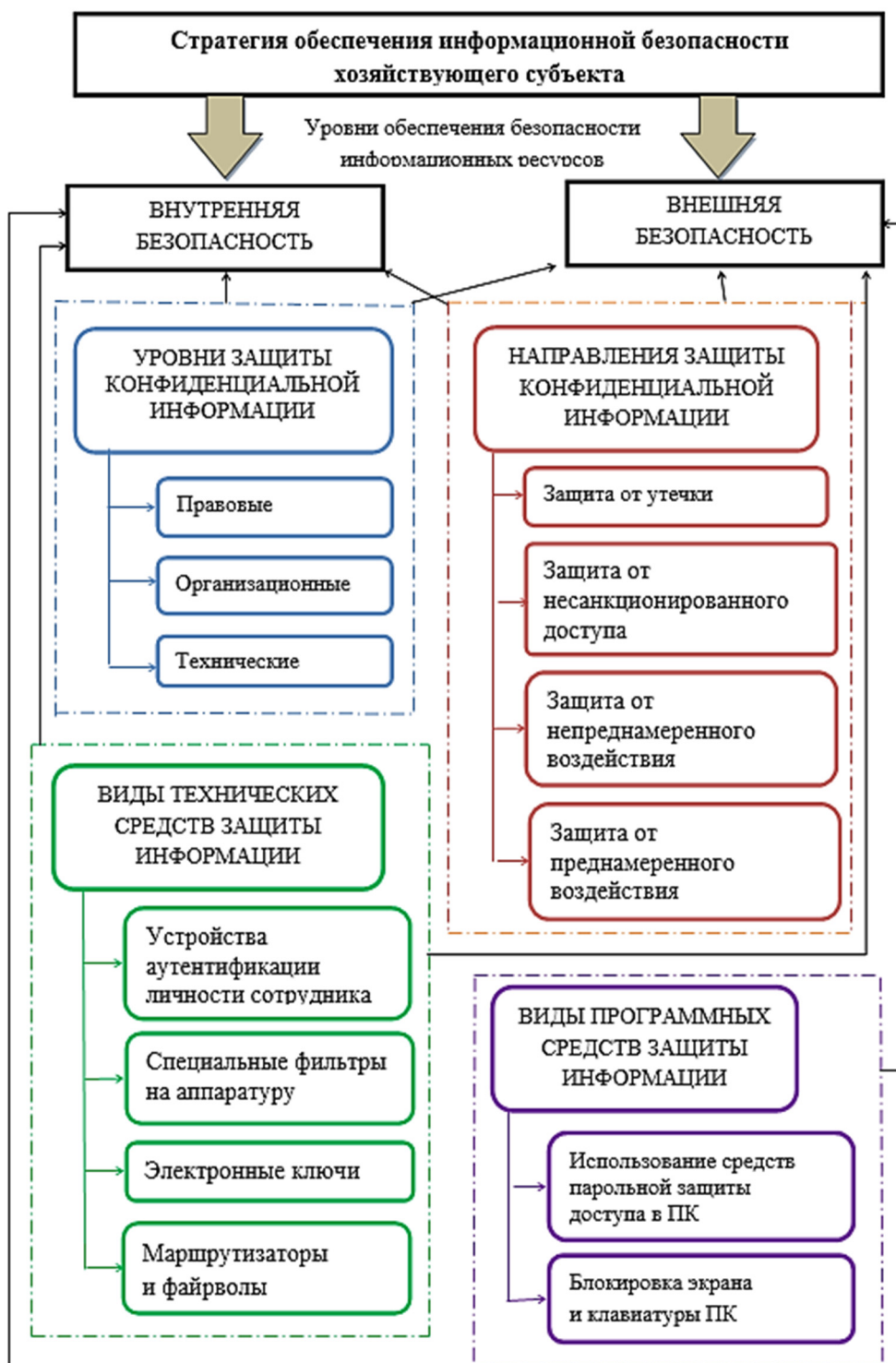


Рис. 5. Комплексный подход к совершенствованию методов и механизмов защиты информационных ресурсов организаций

Согласно официальным данным, главной причиной утечки конфиденциальной информации (до 80 % от общего числа) и других нарушений в сфере защиты информационных ресурсов хозяйствующего субъекта, является человеческий фактор, тогда организации необходимо усилить контроль за действиями своих сотрудников [8].

Основные направления совершенствования кадровой политики в сфере управления информационной безопасностью и, в частности, обеспечения защиты конфиденциальной информации:

1) повышение уровня информационной грамотности, теоретических и практических знаний в области защиты конфиденциальной информации;

2) повышение персональной ответственности сотрудников компании за сохранность сведений конфиденциального характера, усиление трудовой дисциплины и ужесточение мер (способов) дисциплинарного взыскания за нарушения;

3) организация и проведение профилактической работы с трудовым коллективом по предупреждению нарушений (должностных преступлений) в сфере информационной безопасности;

4) совершенствование методов и способов стимулирования сотрудников, имеющих доступ к конфиденциальной информации и средствам защиты информационных ресурсов объекта.

Таким образом, одними из первостепенных задач руководителей хозяйствующего субъекта являются разработка и внедрение эффективных мер, направленных на снижение текучести кадров в организации, стабилизацию кадровой политики, мотивацию персонала на обеспечение сохранности конфиденциальной информации и повышение уровня информационной безопасности объекта в целом [10]. Уровень качества материально-технического и программного обеспечения процесса «сбор – хранение – использование конфиденциальной информации» также во многом зависит от обеспеченности компании кадровыми и финансовыми ресурсами [11, 12].

Заключение

Обобщая все вышесказанное, можно сделать следующий вывод: на современном этапе развития экономического пространства, бизнес-процессов и общества информация является своеобразным товаром, обладающим особой ценностью и значимостью. В связи с этим проблема защиты конфиденциальной бизнес-информации от утечки и разглашения – это ключевая задача хозяйствующего субъекта в сфере реализации собственной стратегии обеспечения финансово-экономической стабильности и экономической безопасности.

Тесная взаимосвязь уровня экономической безопасности хозяйствующего субъекта, его финансовой устойчивости, стратегии обеспечения конкурентоспособности на долгосрочную перспективу и возможности по предотвращению утечки конфиденциальной информации, доказывают необходимость реализации комплексного подхода к обеспечению информационной безопасности объекта. Основу данной комплексной системы должны составлять административно-управленческие, организационно-технические и программно-аппаратные методы защиты информационных ресурсов от несанкционированного доступа и использования. Уровень эффективности функционирования данной системы напрямую зависит от уровня профессиональной компетентности сотрудников предприятия, а также их порядочности и морально-этических принципов.

Таким образом, несмотря на рост уровня информатизации и компьютеризации всех бизнес-процессов, самым приоритетным направлением в сфере обеспечения экономической безопасности хозяйствующего субъекта по-прежнему остается совершенствование кадровой политики компании, в том числе по вопросу защиты конфиденциальности информационных ресурсов бизнеса.

Список литературы

1. Кондрашова Н. Г. Защита информации как важная составляющая экономической безопасности // *Modern Economy Success*. 2022. № 6. С. 149–153.
2. Об информации, информационных технологиях и о защите информации : федер. закон № 149-ФЗ от 27.07.2006 (ред. от 09.11.2024) // КонсультантПлюс. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 26.11.2024).
3. Ткачева М. В., Береснев Н. Р. Средства и методы защиты информации в рамках обеспечения экономической безопасности организации: основная характеристика // *Современная экономика: проблемы и решения*. 2024. № 5 (173). С. 165–177.
4. Фомичева И. В., Юдина О. В., Поляков Д. В. Разработка мер защиты конфиденциальной управленческой информации в организации // *Научные исследования и разработки. Экономика*. 2024. Т. 12, № 2. С. 56–60.
5. Евсултанова М. М., Селиванова С. Е., Мощенко О. В. Информационная безопасность как составляющая экономической безопасности организации // *Экономические науки*. 2023. № 229. С. 124–127.
6. Positive technologies. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/> (дата обращения: 27.11.2024).
7. Сорокин П. А. Разработка мер по совершенствованию системы защиты коммерческой тайны в целях повышения уровня экономической безопасности коммерческих организациях // *Вестник евразийской науки*. 2023. Т. 15, № S6.
8. Кибербезопасность 2023 в цифрах, прогноз на 2024. URL: <https://wtcmoscow.ru/company/news/5334/?ysclid=lun0s> (дата обращения: 27.11.2024).
9. Лунева С. К., Комиссарова М. А., Семенова В. Н. Актуальные вопросы обеспечения информационной безопасности объектов экономики // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2024. № 2 (68). С. 107–114.
10. Гамидуллаева Л. А. Управление и прогнозирование инновационного развития социально-экономических систем: теория, методология и практика. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. 430 с. EDN: ACCSCO
11. Vasin S. M., Gamidullaeva L. A., Finogeev A. G. [et al.]. The use of benchmarking tool to improve efficiency of company's innovation activities in the conditions of digital economy // *International Journal of Process Management and Benchmarking*. 2021. Vol. 11, № 2. P. 151–177. doi: 10.1504/IJPMB.2021.113736 EDN: GFZIU Y
12. Васин С. М., Финогеев А. Г., Гамидуллаева Л. А. [и др.]. Разработка методики моделирования и прогнозирования конкурентоспособности научно-технических предприятий с использованием технологии бенчмаркинга // *РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция*. 2019. № 4. С. 190–196. EDN: QWSZLR

References

1. Kondrashova N.G. Information protection as an important component of economic security. *Modern Economy Success*. 2022;(6):149–153. (In Russ.)
2. About information, information technologies and information protection : feder. Law № 149-FZ of 27.07.2006 (as amended on 09.11.2024). *ConsultantPlus*. (In Russ.). Available at: www.consultant.ru (accessed 26.11.2024).
3. Tkacheva M.V., Beresnev N.R. Means and methods of information protection in the framework of ensuring the economic security of the organization: the main characteristics. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya = Modern economics: problems and solutions*. 2024;(5):165–177. (In Russ.)

4. Fomicheva I.V., Yudina O.V., Polyakov D.V. Development of measures to protect confidential management information in an organization. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki. Ekonomika = Scientific research and development. Economy*. 2024;12(2): 56–60. (In Russ.)
5. Evsultanova M.M., Selivanova S.E., Moshchenko O.V. Information security as a component of an organization's economic security. *Ekonomicheskie nauki = Economic sciences*. 2023;(229):124–127. (In Russ.)
6. *Positive technologies*. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/> (accessed 27.11.2024).
7. Sorokin P.A. Development of measures to improve the system of trade secret protection in order to increase the level of economic security of commercial organizations. *Vestnik evraziyskoy nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2023;15(S6). (In Russ.)
8. *Kiberbezopasnost' 2023 v tsifrah, prognoz na 2024 = Cybersecurity 2023 in numbers, forecast for 2024*. (In Russ.). Available at: <https://wtcmoscow.ru/company/news/5334/?ysclid=lun0s> (accessed 27.11.2024).
9. Luneva S.K., Komissarova M.A., Semenova V.N. Current issues of ensuring information security of economic facilities. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa = Technical and technological problems of the service*. 2024;(2):107–114. (In Russ.)
10. Gamidullaeva L.A. *Upravlenie i prognozirovanie innovatsionnogo razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: teoriya, metodologiya i praktika = Management and forecasting of innovative development of socio-economic systems: theory, methodology and practice*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:430. (In Russ.).
11. Vasin S.M., Gamidullaeva L.A., Finogeev A.G. [et al.]. The use of benchmarking tool to improve efficiency of company's innovation activities in the conditions of digital economy. *International Journal of Process Management and Benchmarking*. 2021; 11(2):151–177. doi: 10.1504/IJPMB.2021.113736
12. Vasin S.M., Finogeev A.G., Gamidullaeva L.A. [et al.]. Development of a methodology for modeling and forecasting the competitiveness of scientific and technical enterprises using benchmarking technology. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsiya = RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2019;(4):190–196. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Светлана Сергеевна Солдатова

кандидат экономических наук, доцент
кафедры менеджмента
и государственного управления,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sssoldatova@mail.ru

Svetlana S. Soldatova

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

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

Поступила в редакцию/Received 02.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 23.01.2025

Принята к публикации/Accepted 29.01.2025

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ОТРАСЛИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. В. Шмелева¹, Т. И. Хорошилова²

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

¹ nshmeleva@misis.ru, ² khoroshilova71@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность обусловлена необходимостью разработки новых стратегий, направленных на повышение технологической, ресурсной и экологической эффективности предприятий промышленной отрасли строительных материалов. Цель исследования состоит в развитии подходов к стратегическому сценарному моделированию для повышения ресурсной эффективности и потенциала предприятий. *Материалы и методы.* Методической основой исследования является сценарное моделирование как инструмент стратегического анализа и прогнозирования. Комплекс детерминистского и адаптивного подходов позволяет разрабатывать стратегические сценарии в условиях высокой неопределенности и изменчивости внешней среды. *Результаты.* Реализовано сценарное моделирование развития ресурсного потенциала предприятия посредством построения комплекса моделей (адаптивная, эколого-социальная и модель «зеленой» интеграции). Предложенный инструментальный апробирован на примере АО «Нефрит-керамика», что позволило разработать для предприятия сценарий ресурсоэффективного развития. *Выводы.* Проведенное исследование демонстрирует растущую значимость «зеленой» повестки и гармонизации, заключающейся в сочетании экологических, технологических и экономических аспектов процесса производства строительных материалов. Практическая значимость проведенного исследования заключается в возможности снижения потерь и затрат при эколого ориентированном сценарии развития.

Ключевые слова: ресурсная эффективность, сценарное моделирование, устойчивое развитие, ресурсный потенциал

Для цитирования: Шмелева Н. В., Хорошилова Т. И. Сценарное моделирование повышения ресурсного потенциала предприятий отрасли строительных материалов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 47–59. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-4

SCENARIO MODELLING OF INCREASING THE RESOURCE POTENTIAL OF ENTERPRISES IN THE CONSTRUCTION MATERIALS INDUSTRY

N.V. Shmeleva¹, T.I. Khoroshilova²

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

¹ nshmeleva@misis.ru, ² khoroshilova71@gmail.com

Abstract. Background. The relevance is determined by the need to develop new strategies aimed at improving the technological, resource and environmental efficiency of enterprises in the industrial sector of building materials. The aim of the study is to develop approaches to strategic scenario modelling to improve resource efficiency and potential of enterprises. *Materials and methods.* The methodological basis of the study is scenario modelling as a tool of strategic analysis and forecasting. The complex of deterministic and adaptive approaches allows strategic scenarios to develop in conditions of high uncertainty and variability of the external environment. *Results.* Scenario modelling of the enterprise resource potential development through the construction of a set of models (adaptive, ecological-social and "green" integration model) was implemented. The proposed approaches were tested on the example of JSC "Nefrit Ceramics", which allowed us to develop a scenario of resource-efficient development for the enterprise. *Conclusions.* The conducted research demonstrates the growing importance of the green agenda and harmonisation, which consists in the combination of environmental, technological and economic aspects of the process of production of building materials. The practical significance of the research conducted lies in the possibility of reducing losses and costs in an environmentally oriented development scenario.

Keywords: resource efficiency, scenario modelling, sustainable development, resource potential

For citation: Shmeleva N.V., Khoroshilova T.I. Scenario modelling of increasing the resource potential of enterprises in the construction materials industry. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):47–59. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-4

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых стратегий, направленных на повышение технологической, ресурсной и экологической эффективности предприятий промышленной отрасли строительных материалов. В результате стратегической сессии Правительства РФ были даны поручения Минэкономразвития России и профильным министерствам разработать в кратчайшие сроки комплексную межотраслевую модель управления в области повышения энергетической и ресурсной эффективности экономики [1]. Распоряжением Правительства РФ от 12 апреля 2025 г. № 908-р утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года» [2]. В Стратегии обозначены основные цели для промышленных предприятий: снижение энергоемкости производства востребованных видов продукции и ее углеродного следа; необходимость разработки и внедрения сквозных технологий, прежде всего российских. Обеспечение энергоэффективности является неотъемлемой частью повышения ресурсной эффективности. В связи с этим вопросы повышения энергетической и ресурсной эффективности в отрасли строительных материалов приобретают особую актуальность.

Различные теоретико-методологические подходы к определению сущности ресурсной эффективности находят отражение в концептуальных моделях. В теории управления выделяют модели: системно-ресурсную; целевую; модель удовлетворенности участника; комплексную. Эффективность как интегральная и структурированная характеристика деятельности является не только показателем, но и процессом, который необходимо организовать и которым нужно управлять [3]. Проблему повышения эффективности использования ограниченных ресурсов рассматривают «теория экономического роста Р. Солоу, теория мирохозяйственных (технологических) укладов С. Ю. Глазьева, теория управления ресурсами Дж. Стиглица, концепция устойчивого

развития, которая определила междисциплинарность современных исследований» [4–6]. По результатам наукометрического анализа установлено, что возрастает интерес ученых и практиков к интеграции эколого-технологических и экономических аспектов в деятельность промышленных предприятий. Наибольшее внимание уделяется вопросам «зеленой» повестки, ее воздействию на устойчивое развитие и снижение ресурсоемкости производства [7–9]. Цель исследования состоит в развитии подходов к стратегическому сценарному моделированию для повышения ресурсной эффективности и потенциала предприятий.

Материалы и методы

Управление ресурсной эффективностью на предприятии – это прежде всего совокупность стратегических решений, которые предприятие принимает, исходя из оценки существующих вызовов и трендов, стратегических государственных и отраслевых приоритетов, а также анализа собственного потенциала [10]. Существующие подходы к управлению ресурсной эффективностью целесообразно рассматривать в соответствии с этапами управления стратегией повышения ресурсной эффективности предприятия (рис. 1), которую можно реализовывать как через последовательную технологическую модернизацию процессов производства, так и через разработку и внедрение эколого-технологических проектов, в том числе с участием других организаций.



Рис. 1. Система управления ресурсной эффективностью производства на принципах бережливого производства и устойчивого развития (составлено авторами)

Метод сценарного моделирования – это инструмент стратегического анализа и прогнозирования, который используется для оценки возможных будущих ситуаций и разработки планов действий на основе различных сценариев. Основная цель сценарного моделирования заключается в том, чтобы помочь лицам, принимающим решения, подготовиться к различным вариантам развития событий, минимизировать риски и воспользоваться потенциальными возможностями.

Этапы метода сценарного моделирования:

1. Определение цели и границ исследования.
2. Выявление ключевых факторов и драйверов изменений.
3. Формирование сценариев.
4. Анализ последствий каждого сценария.

5. Разработка стратегий и планов действий.

6. Мониторинг и корректировка.

Базовые принципы сценарного моделирования:

- признание неопределенности – метод исходит из того, что будущее не является однозначно предсказуемым. Вместо попыток точного прогноза создаются несколько вероятных сценариев, каждый из которых отражает определенный набор условий и факторов;

- системность подхода – сценарное моделирование учитывает взаимосвязь между различными факторами. Это позволяет создавать целостные картины будущего, в которых изменения в одной области могут повлиять на другие;

- многовариантность – каждый сценарий представляет собой логически обоснованную последовательность событий, которая может произойти при определенных условиях;

- фокус на ключевых факторах – для построения сценариев выявляются ключевые драйверы изменений. Это могут быть макроэкономические показатели, технологические тренды, изменения в законодательстве, социальные изменения;

- логическая согласованность – каждый сценарий должен быть внутренне непротиворечивым. Все элементы сценария должны быть связаны между собой и логически следовать из выбранных предположений;

- гибкость и адаптивность – сценарное моделирование помогает организациям быть гибкими и адаптироваться к меняющимся условиям. Планы действий разрабатываются таким образом, чтобы их можно было корректировать в зависимости от того, какой сценарий начинает реализовываться;

- итеративность процесса – сценарии могут корректироваться по мере появления новой информации или изменения внешних условий.

Предписывающий (детерминистский) подход основан на предположении, что будущее можно прогнозировать и планировать заранее. Стратегия разрабатывается как четкий план действий, который направлен на достижение конкретных целей в условиях относительной стабильности и предсказуемости внешней среды [11]. Основные характеристики:

- долгосрочное планирование;

- акцент на анализе текущей ситуации и прогнозировании будущего;

- жесткая структура управления;

- стратегия формулируется руководством.

Адаптивный (гибкий) подход ориентирован на работу в условиях высокой неопределенности и изменчивости внешней среды. Стратегия рассматривается как процесс постоянной адаптации к изменениям, а не как жесткий план.

Основные характеристики:

- гибкость и готовность к изменениям;

- акцент на экспериментах, обучении и корректировке курса;

- распределение ответственности за принятие решений между различными уровнями организации;

- использование методов, таких как сценарное моделирование, для подготовки к различным вариантам будущего.

Адаптивное управление – это подход к управлению организациями, который предполагает постоянную корректировку стратегий и действий в ответ на изменения внешней среды. Этот подход основан на принципах гибкости, обучения и экспериментирования, что позволяет организациям эффективно реагировать на неопределенность и сложность современного мира.

В соответствии с теорией и методологией В. Л. Квинта в стратегировании нет настоящего, а только прошлое и будущее [12]. Следовательно, при разработке концепции стратегии развития предприятий в области повышения ресурсной эффективности с учетом принципов бережливого производства (БП) и устойчивого развития (УР) необходимо моделировать развитие ресурсного потенциала.

Результаты и обсуждение

Предложенные подходы к стратегическому сценарному моделированию апробированы на примере предприятия АО «Нефрит-Керамика», специализирующегося на производстве керамических плиток для внутренней облицовки стен, полов и фасадов. На первом шаге моделирования необходимо провести отраслевой анализ.

По данным на конец 2024 г. Россия имеет большой внутренний рынок керамической плитки, где доминируют локальные производители (Kerama Marazzi, Unitile, LB-Ceramics, Estima и т.д.) и сохраняется спрос в среднем ценовом сегменте. Позиции отечественных компаний в этой нише укрепляются за счет уменьшения прямой конкуренции со стороны ряда европейских поставщиков и стратегической ориентацией на импортозамещение (рис. 2, 3).

По последним доступным данным (до 2024 г.) объемы производства керамической плитки в РФ составляют 200–250 млн м² в год. Спрос формируется за счет жилищного строительства и коммерческих объектов.

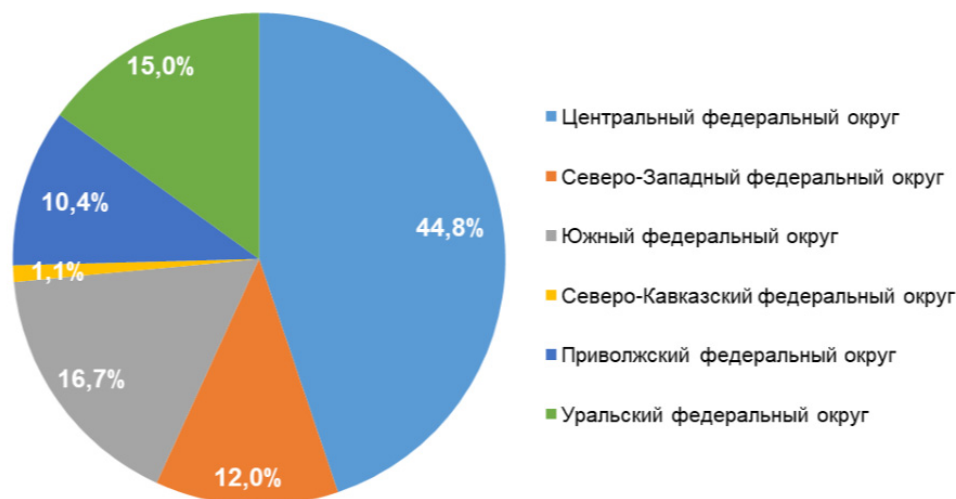


Рис. 2. Производство керамической плитки по федеральным округам, 2024 г. [13]

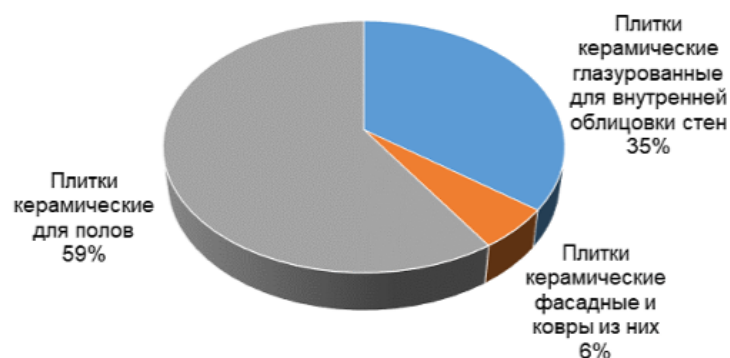


Рис. 3. Структура производства керамической плитки по видам продукции, 2024 г. [13]

При производстве керамической плитки можно условно выделить следующие процессы, которые имеют наибольшее значение в цепочке создания ценности:

1. Приемка и хранение сырьевых материалов (глина, каолин, наполнители, глазурь, пигменты).
2. Массозаготовка, приготовление пресс-порошка (массы) и формование полуфабриката.
3. Сушка, декорирование и обжиг.
4. Послеобжиговая обработка.
5. Сортировка и упаковка готовых изделий.

Одним из критических процессов производства керамической плитки с точки зрения энергоемкости является обжиг. Производство керамической плитки является энергоемким процессом. Удельное энергопотребление в производстве керамической плитки АО «Нефрит-Керамика» составляет 6,9 ГДж/т, что выше на 2,4 ГДж/т по сравнению с лучшими производителями керамической плитки в государствах – членах Европейского союза. Основные затраты энергии приходятся на процесс обжига. Удельное потребление электроэнергии – 0,12 ГДж/т, а удельное потребление природного газа – 4,3 ГДж/т [14]. Потребление энергии – это универсальный индикатор эффективности всех остальных процессов, через который проявляются: технологические потери, нерациональный режим работы, избыточные затраты на транспортировку; неэффективная логистика внутри цеха и устаревшие модели управления.

Резервы повышения ресурсной эффективности в отрасли строительных материалов условно делят на несколько основных типов: технологическая модернизация, автоматизация и цифровизация, организационные меры и контроль режимов, использование вторичных ресурсов и возобновляемых источников энергии, энергоаудит и техническая диагностика.

Результаты проведенного исследования демонстрируют растущую значимость «зеленой» повестки и гармонизации, заключающейся в сочетании экологических, технологических и экономических аспектов процесса производства керамической плитки. В связи с этим представляется целесообразным использовать следующую систему моделей при разработке сценариев развития ресурсного потенциала АО «Нефрит-Керамика» (табл. 1).

Таблица 1

Модели развития ресурсного потенциала АО «Нефрит-Керамика»
(составлено авторами)

Вид модели	Содержание	Подходы	Инструменты
Адаптивная модель	Ориентирована на работу в условиях высокой неопределенности и изменчивости внешней среды	Сценарный и процессный подходы	Современные технологические платформы и инструменты прогнозирования
Модель эколого-социального развития	Интеграция принципов устойчивого развития и социальной ответственности в управление процессами	Эко-инновационный подход	Сбалансированное, гармоничное развитие, при котором соблюдается баланс между экономико-социальным и рациональным природопользованием
Модель «зеленой» интеграции	Добровольное объединение заинтересованных сторон (государство, бизнес, научные институты, общество и др.), направленное на совместное достижение общих целей в области устойчивого развития путем реализации «зеленых» проектов	Системный и пентаспиральный подходы	Цифровые платформы, блокчейн для обеспечения взаимодействия акторов экинтеграций

Последовательность выбора модели развития ресурсного потенциала для обоснования сценариев развития предложена на рис. 4.



Рис. 4. Последовательность выбора модели развития ресурсного потенциала промышленного предприятия (составлено авторами)

Сценарий 1. Инновационно-технологический лидер

«Ресурсный потенциал рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. Важным инструментом, позволяющим результативно реализовывать промышленную стратегию, является планирование через формирование комплекса программ и проектов» [15]. Сценарий фокусируется на технологическом обновлении и инновациях как ключевом драйвере успеха.

Основные направления:

1. Инвестиции в инновации: разработка и внедрение энергоэффективных технологий, создание научно-исследовательского центра совместно с университетами и научными учреждениями в форме научно-промышленного кластера.

2. Автоматизация и цифровизация: создание цифровой платформы для мониторинга экологических показателей и управления производством, внедрение современных технологий цифровой печати для керамической плитки.

3. Партнерство и сотрудничество: участие в международных и национальных инициативах по декарбонизации и устойчивому развитию.

Возможности при реализации сценария:

- лидерство в технологическом развитии;
- повышение конкурентоспособности на глобальном уровне;
- привлечение инвестиций и получение субсидий от государства.

Риски: высокие первоначальные затраты на разработку и внедрение технологий; импортозависимость по отдельным технологиям и материалам, необходимым для производства керамической плитки.

Сценарий 2. Эколого ориентированное развитие

Данный сценарий предусматривает интеграцию принципов устойчивого развития и бережливого производства в управление промышленными процессами. Ключевым аспектом является гармоничное развитие, при котором соблюдается баланс между экономико-социальным развитием и рациональным природопользованием. Стратегический приоритет экологизации играет важную роль в принятии решений.

Основные направления:

1. Модернизация производства: снижение выбросов CO₂ за счет внедрения систем улавливания углекислого газа и использования альтернативных видов топлива, внедрение энергоэффективных и ресурсоэффективных технологий, позволяющих сократить потребление энергии на 25 %.

2. Создание промышленных симбиотических цепочек для переработки отходов, когда отходы одних являются ресурсами для других.

3. Участие в восстановлении природных экосистем.

4. Образовательные и социальные инициативы в области «зеленой» повестки: разработка и реализация программ по обучению сотрудников системе бережливого производства и принципам устойчивого развития и информирование общественности о достижениях компании в области УР.

Возможности при реализации сценария:

- формирование репутации экологически ответственного производителя;
- повышение доверия со стороны партнеров и потребителей;
- участие в программах «зеленого» финансирования.

Риски: длительный срок окупаемости экологических проектов, значительный объем инвестиций в модернизацию оборудования.

Сценарий 3. «Зеленая» интеграция

Этот сценарий направлен на развитие партнерства как основного фактора успеха. Сетевое объединение на мезо- и микроуровнях в строительной отрасли всех потенциальных участников позволит реализовать принципы БП и УР по всей цепочке жизненного цикла. Сотрудничество в форме «зеленой» интеграции позволяет обеспечивать обмен информацией, ресурсами и знаниями в области «зеленого» строительства, объединять взаимодополняющие ресурсы, вырабатывать компромиссные управленческие решения, исходя из интересов всех сторон.

Основные направления:

1. Инвестиции в «зеленые» и социальные проекты.
2. Сотрудничество и партнерство: создание экокластера с участием малого и среднего бизнеса.
3. Поддержка экологических инициатив.

Возможности при реализации сценария: повышение ресурсной эффективности и энергоэффективности, управление отходами, снижение эксплуатационных расходов, доступ к «зеленым» финансовым инструментам, соответствие требованиям «зеленых» стандартов, улучшение имиджа компании АО «Нефрит-керамика», повышение качества жизни и экологического благополучия граждан.

Риски: возможные конфликты интересов между различными группами заинтересованных сторон; высокая стоимость «зеленых» технологий и проектов в отрасли строительных материалов; сложность понимания требований и процессов документирования; низкий уровень осведомленности об успешных практиках «зеленого» строительства.

С повышением ресурсной эффективности и потенциала АО «Нефрит-Керамика» может стать участником системы государственной поддержки промышленных предприятий. В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 30 апреля 2019 г. № 541 (в редакции 2022 г.) субсидии предоставляются организациям, чьи инвестиционные проекты направлены на снижение удельных выбросов парниковых газов и повышение ресурсной и энергетической эффективности производства [16]. В результате сценарного моделирования, направленного на повышение ресурсной эффективности, АО «Нефрит-Керамика» помимо прямых положительных эффектов получит репутационные преимущества (социально-экологическая ответственность, ответственный производитель).

Заключение

Проанализированы текущее состояние и развитие производства керамической плитки в Российской Федерации. Выявлены тренды и перспективные направления развития отрасли строительных материалов, а также риски и угрозы. Установлено, что российский рынок керамической плитки сконцентрирован на внутреннем потреблении (180–250 млн м²/год). Перспективы включают стабилизацию спроса, расширение ассортимента, экспорт в ЕАЭС/СНГ и инжиниринг ключевых производственных процессов для снижения импортозависимости. Основными вызовами являются необходимость снижения энергоемкости производства в условиях санкционных ограничений, ужесточение экологических стандартов, снижение уровня импортозависимости по глазури и другим материалам.

Реализовано сценарное моделирование развития ресурсного потенциала промышленного предприятия посредством построения комплекса моделей (адаптивная, эколого-социальная и модель «зеленой» интеграции). Предложенный инструментарий апробирован на примере АО «Нефрит-керамика», что позволило разработать для предприятия сценарий ресурсоэффективного развития. Практическая значимость проведенного исследования заключается в возможности снижения потерь и затрат при эколого ориентированном сценарии развития и участия в программах господдержки (Постановление № 541).

Однако стратегия повышения ресурсного потенциала не может оставаться обособленной инициативой. Необходимое условие ресурсной эффективности – это интеграция стратегии устойчивого развития в основной стратегический план бизнеса. Новый тренд для российской отрасли строительных материалов – это «зеленое» строительство. Строительные компании поддержали этот тренд, понимая, что «зеленая» трансформация затрагивает все уровни и функции компаний, становясь основой глубокой организационной перестройки.

Важным направлением дальнейшего исследования является разработка системы показателей для оценки эффективности стратегических сценариев развития. Применение KPI будет способствовать повышению прозрачности и результативности управленческих решений, направленных на развитие ресурсного потенциала.

Список литературы

1. Поручения правительства РФ. URL: http://government.ru/dep_news/54417/ (дата обращения: 23.05.2025).
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJYIA60.pdf> (дата обращения: 23.05.2025).
3. Филин С. А., Якушев А. Ж., Великороссов В. В. Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов в инновационном менеджменте. М. : Русайнс, 2024. 484 с.
4. Глазьев С. Ю. О создании систем стратегического планирования и управления научно-техническим развитием // Инновации. 2020. № 2 (256). С. 14–23. doi: 10.26310/2071–3010.2020.256.2.002
5. Solow R. N. A contribution to the theory of economic growth // The Quarterly Journal of Economics. 1956. Vol. 70, issue 1. P. 65–94.
6. Stieglitz J. People, power, and profits: Progressive capitalism for an age of discontent. W. W. Norton & Company, 2019. 366 p.
7. Kuo C.-G., Chiu C.-W., Chung P.-S. A New Approach to Expanding Interior Green Areas in Urban Buildings // Buildings. 2025. № 15. P. 1965. doi: 10.3390/buildings15121965
8. Zhao Q., Wu Z., Yu Y., [et al.] Exploring Carbon Emissions in the Construction Industry: A Review of Accounting Scales, Boundaries, Trends, and Gaps // Buildings. 2025. № 15. P. 1900. doi: 10.3390/buildings15111900
9. Shmeleva N., Tolstykh T., Guseva T., Volosatova A. Open Environmental Collaborations as an Innovation Tool for Sustainable Development: Evidence from Russian Pulp and Paper Industry // Sustainability. 2025. № 17. P. 1154. doi: 10.3390/su17031154
10. Хорошилова Т. И. Стратегический анализ японской и российской модели менеджмента // Теория и практика стратегирования : сб. избр. науч. ст. и материалов VII Междунар. науч.-практ. конф. (27 февраля 2024 г.). Т. XIII. Индустриальный Университариум Стратега / под науч. ред. В. Л. Квинта. М. : Издательский дом НИТУ МИСИС, 2024. 174 с. (Серия «Экономическая и финансовая стратегия»).

11. Tolstykh T., Shmeleva N., Boev A. [et al.]. System Approach to the Process of Institutional Transformation for Industrial Integrations in the Digital Era // *Systems*. 2024. № 12. P. 120. doi: 10.3390/systems12040120
12. Kvint V. L., Bodrunov S. D. Strategizing Societal Transformation. Knowledge, Technologies, and Noonomy. USA (Palm Bay) ; Canada (Burlington) ; United Kingdom (Abingdon) : Apple Academic Press, 2023. 228 p.
13. ИТС 4–2023. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство керамических изделий (утв. Приказом Росстандарта от 27.12.2023 № 2807).
14. Официальный сайт Производителя керамической плитки АО «Нефрит-Керамика». URL: <https://nefrit.ru/> (дата обращения: 29.05.2025).
15. Гамидуллаева Л. А., Шуструйский А. В. Стратегирование устойчивого развития промышленных предприятий для обеспечения технологического суверенитета в топливно-энергетическом комплексе // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2024. № 2 (50). С. 35–49. doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-3
16. Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским организациям на возмещение части затрат на выплату купонного дохода по облигациям, выпущенным в рамках реализации инвестиционных проектов по внедрению наилучших доступных технологий, и (или) на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях, государственной корпорации развития «ВЭБ.РФ» : постановление Правительства РФ № 541 от 30 апреля 2019 г.

References

1. *Porucheniya pravitel'stva RF = Instructions from the Government of the Russian Federation*. (In Russ.). Available at: http://government.ru/dep_news/54417/ (accessed 23.05.2025).
2. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2050 goda = Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2050*. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/LWYf-SENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJY1A60.pdf> (accessed 23.05.2025).
3. Filin S.A., Yakushev A.Zh., Velikorossov V.V. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti investitsionnykh projektov v innovatsionnom menedzhmente = Assessment of the economic efficiency of investment projects in innovation management*. Moscow: Rusayns, 2024:484. (In Russ.)
4. Glaz'ev S.Yu. Assessment of the economic efficiency of investment projects in innovation management. *Innovatsii = Innovation*. 2020;(2):14–23. (In Russ.). doi: 10.26310/2071–3010.2020.256.2.002
5. Solow R.N. A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 1956;70(1):65–94.
6. Stieglitz J. *People, power, and profits: Progressive capitalism for an age of discontent*. W.W. Norton & Company, 2019:366.
7. Kuo C.-G., Chiu C.-W., Chung P.-S. A New Approach to Expanding Interior Green Areas in Urban Buildings. *Buildings*. 2025;(15):1965. doi: 10.3390/buildings15121965
8. Zhao Q., Wu Z., Yu Y. et al. Exploring Carbon Emissions in the Construction Industry: A Review of Accounting Scales, Boundaries, Trends, and Gaps. *Buildings*. 2025;(15):1900. doi: 10.3390/buildings15111900
9. Shmeleva N., Tolstykh T., Guseva T., Volosatova A. Open Environmental Collaborations as an Innovation Tool for Sustainable Development: Evidence from Russian Pulp and Paper Industry. *Sustainability*. 2025;(17):1154. doi: 10.3390/su17031154
10. Khoroshilova T.I. Strategic analysis of the Japanese and Russian management models. *Teoriya i praktika strategirovaniya: sb. izbr. nauch. st. i materialov VII Mezhdunar.*

- nauch.-prakt. konf. (27 fevralya 2024 g.). T. XIII. Industrial'nyy Universitariy Ctratega = Theory and practice of strategizing : collection of selected scientific articles and materials of the VII International Scientific and Practical Conference (February 27, 2024). Vol. XIII. Industrial Strategist's University. Moscow: Izdatel'skiy dom NITU MISIS, 2024:174. (In Russ.)*
11. Tolstykh T., Shmeleva N., Boev A. et al. System Approach to the Process of Institutional Transformation for Industrial Integrations in the Digital Era. *Systems*. 2024;(12):120. doi: 10.3390/systems12040120
 12. Kvint V.L., Bodrunov S.D. *Strategizing Societal Transformation. Knowledge, Technologies, and Noonomy*. USA (Palm Bay); Canada (Burlington); United Kingdom (Abingdon): Apple Academic Press, 2023:228.
 13. ITS 4-2023. *Informatsionno-tehnicheskiiy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Proizvodstvo keramicheskikh izdeliy (utv. Prikazom Rosstandarta ot 27.12.2023 № 2807) = ITS 4-2023. Information and technical handbook on the best available technologies. Production of ceramic products (approved by Rosstandart Order No. 2807 dated December 27, 2023).* (In Russ.)
 14. *Ofitsial'nyy sayt Proizvoditelya keramicheskoy plitki AO «Nefrit-Keramika» = The official website of the Manufacturer of ceramic tiles JSC "Nefrit-Keramika".* (In Russ.). Available at: <https://nefrit.ru/> (accessed 29.05.2025).
 15. Gamidullaeva L.A., Shustruyskiy A.V. Strategizing the sustainable development of industrial enterprises to ensure technological sovereignty in the fuel and energy complex. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2024;(2):35–49. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-3
 16. *Ob utverzhdenii Pravil predostavleniya subsidiy iz federal'nogo byudzheta rossiyskim organizatsiyam na vozmeshchenie chasti zatrat na vyplatu kuponного dokhoda po obligatsiyam, vypushchennym v ramkakh realizatsii investitsionnykh projektov po vnedreniyu nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy, i (ili) na vozmeshchenie chasti zatrat na uplatu protsentov po kreditam, poluchennym v rossiyskikh kreditnykh organizatsiyakh, gosudarstvennoy korporatsii razvitiya «VEB.RF»: postanovlenie Pravitel'stva RF № 541 ot 30 aprelya 2019 g. = On Approval of the Rules for Granting Subsidies from the Federal Budget to Russian Organizations to Reimburse Part of the Cost of Paying Coupon Income on Bonds Issued as part of Investment Projects to introduce the Best Available Technologies, and (or) to reimburse part of the cost of Paying Interest on Loans Received from Russian Credit Organizations, the State Development Corporation "WEB.RF" : Decree of the Government of the Russian Federation No. 541 dated April 30, 2019.* (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Надежда Васильевна Шмелева

доктор экономических наук, доцент,
профессор кафедры цифрового
менеджмента и инноватики,
Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСИС»
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т,
д. 4, стр. 1)
E-mail: nshmeleva@misis.ru

Nadezhda V. Shmeleva

Doctor of economical sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of digital management and innovation,
National University of Science
and Technology "MISIS"
(1 build, 4 Leninskiy avenue, Moscow, Russia)

Татьяна Игоревна Хорошилова
аспирант кафедры промышленного
менеджмента,
Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСИС»
(Россия, г. Москва, Ленинский
пр-т, д. 4, стр. 1)
E-mail: khoroshilova71@gmail.com

Tatiana I. Khoroshilova
Postgraduate student of the the sub-
department of industrial management,
National University of Science
and Technology "MISIS"
(1 build, 4 Leninskiy avenue, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.05.2025
Поступила после рецензирования/Revised 29.05.2025
Принята к публикации/Accepted 30.05.2025

РАСТУЩИЙ ЭКСПОРТ И НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИЙСКОЙ ЧЕЧЕВИЦЫ

Н. Ю. Полунина

Научно-исследовательский институт экономики и организации
агропромышленного комплекса Центрально-Черноземного района –
филиал Воронежского федерального аграрного научного центра
имени В. В. Докучаева, Воронеж, Россия
nata-polo801@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность проводимого исследования подтверждается растущим интересом к чечевице во всем мире и соответствует целевым показателям и задачам, установленным Указом Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». Цель исследования – проведение анализа экспорта чечевицы из России в 2015–2024 гг. Для достижения указанной цели исследования были поставлены и последовательно решены следующие задачи по оценке: топ-10 портов (терминалов) России по экспорту чечевицы; топ-10 стран-импортеров чечевицы России; топ-10 компаний-экспортеров чечевицы России; компаний-импортеров чечевицы от крупнейшего экспортера ООО «Волгатрейд» по странам в период с 01.01.2024 по 31.12.2024. *Материалы и методы.* Решение задач проводимого исследования базировалось на данных платформы для аналитики экспорта грузов в российских портах – Logistic Operating System (проект Logistic OS реализует группа компаний «ТБИ»). В процессе исследования были использованы данные Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор), научные публикации отечественных ученых по представленной теме. Выполнение работы осуществлялось с применением методов системного анализа, сравнения, обобщения, интерпретации результатов. *Результаты.* Излагаются результаты анализа экспортных отгрузок чечевицы из Российской Федерации в 2015–2024 гг., проведенного посредством декомпозиции экспорта чечевицы и последовательной оценке топ-10 портов (терминалов) России по экспорту чечевицы; топ-10 стран-импортеров чечевицы России; топ-10 компаний-экспортеров чечевицы России; компаний-импортеров чечевицы от крупнейшего экспортера ООО «Волгатрейд» по странам мира. *Выводы.* Осуществление регулярных поставок чечевицы открывает новые горизонты для отечественной аграрной отрасли, способствует развитию сельскохозяйственного производства, повышает экспортный потенциал России, гарантирует производителям уверенность в стабильности рынков сбыта, что, в свою очередь, влияет на рост качества продукции и стимулирует инвестиции в технологии.

Ключевые слова: чечевица, внешняя торговля, экспорт чечевицы, компания-экспортер, компания-импортер, Турция, порт, терминал

Для цитирования: Полунина Н. Ю. Растущий экспорт и новые перспективы российской чечевицы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 60–74. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-5

GROWING EXPORTS AND NEW PROSPECTS FOR RUSSIAN LENTILS

N.Yu. Polunina

Research Institute of Economics and Organization of Agro-Industrial Complex
of Central Black Earth Region – branch of Voronezh Federal Agricultural
Scientific Centre named after V.V. Dokuchaev, Voronezh, Russia
nata-polo801@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the study is confirmed by the growing interest in lentils around the world and corresponds to the targets and tasks established by Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2024 № 309 "On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036". The purpose of the study is to analyze the export of lentils from Russia in the period 2015–2024. To achieve this goal, the following evaluation objectives were set and consistently addressed: top 10 ports (terminals) of Russia for the export of lentils; top 10 lentil importing countries of Russia; top 10 lentil exporting companies in Russia; lentil importing companies from the largest exporter Volgatrade LLC by country in the period 01.01.2024–31.12.2024. *Materials and methods.* The solution of the tasks of the study was based on the data of the form boards for the analysis of cargo exports in Russian ports – Logistic Operating System (the Logistic OS project is implemented by the TBI. During the study, data from the Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Supervision (Rosselkhoz nadzor), scientific publications of domestic scientists on the presented topic were used. The work was carried out using methods of system analysis, comparison, generalization, interpretation of results. *Results.* The article presents the results of an analysis of export shipments of lentils from the Russian Federation in the period 2015–2024, carried out through the decomposition of lentil exports and a consistent assessment of the top 10 ports (terminals) of Russia for the export of lentils; top 10 lentil importing countries in Russia; top 10 companies exporting lentils in Russia; lentil importing companies from the largest exporter Volgatrade LLC in the world. *Conclusions.* The main idea of the article is that the implementation of regular deliveries of lentils opens up new horizons for the domestic agricultural industry, contributes to the development of agricultural production, increases the export potential of Russia, guarantees producers confidence in the stability of sales markets, which in turn affects the growth of product quality and stimulates investment in technology. On the basis of the identified problems in the development of the CDSS, an idea was formed about the possible problems of the existing CDSS.

Keywords: lentils, foreign trade, export of lentils, exporting company, importing company, Turkey, port, terminal

For citation: Polunina N.Yu. Growing exports and new prospects for Russian lentils. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):60–74. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-5

Введение

Чечевица (*Lens culinaris*) – травянистое растение, принадлежащее к семейству бобовых (*Fabaceae*). Это часть растения с белыми цветками, с высокой питательной ценностью, с круглыми семенами зеленого или коричневого цвета, которые мы используем как чечевицу. Самые известные виды – красная и зеленая чечевицы [1].

Чечевица традиционно считается высокомаржинальной и обладает хорошим потенциалом для расширения рынков сбыта, что позитивно влияет

и на ценообразование. Чечевица остается рентабельной для производства, даже несмотря на значительное снижение закупочных цен. Именно поэтому многие производители не только не сократили под нее посевные площади, но и увеличили. Так произошло, например, в Ростовской области. Затраты на выращивание чечевицы примерно в два раза меньше, чем на пшеницу, а размер прибыли почти одинаков. Из чечевицы не производят продукты первой необходимости, что провоцирует ограниченный спрос на внутреннем рынке. Впрочем, ситуация может измениться в ближайшем будущем – эксперты отмечают популяризацию культуры и прогнозируют расширение рынков сбыта [2].

Актуальность проводимого исследования обосновывается растущим интересом к чечевице во всем мире, о чем свидетельствует значительное увеличение объемов ее поставок. В структуре производства зернобобовых культур чечевица делит 4-5 место с бобами после сои, фасоли и гороха [3]. На сегодняшний день Россия – крупный производитель и экспортер чечевицы [4].

Кроме того, актуальность работы соответствует целевым показателям и задачам, установленным Указом Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»: обеспечение к 2030 г. прироста объема экспорта несырьевых неэнергетических товаров не менее чем на две трети по сравнению с показателем 2023 г. (п. 6 «о»); увеличение к 2030 г. объема производства продукции агропромышленного комплекса не менее чем на 25 % по сравнению с уровнем 2021 г. (п. 6 «п»); увеличение в 2030 г. экспорта продукции агропромышленного комплекса не менее чем в полтора раза по сравнению с уровнем 2021 г. (п. 6 «р») [5]. В этой связи цель исследования состоит в проведении анализа экспорта чечевицы из России в 2015–2024 гг.

Материалы и методы

Информационная база исследования представлена платформой для аналитики экспорта грузов в российских портах – Logistic Operating System (проект Logistic OS реализует группа компаний «ТБИ») [6], посредством которой были получены данные о главных портах (терминалах) России по экспорту чечевицы, основных странах-импортерах чечевицы, ключевых компаниях-экспортерах и компаниях-импортерах российской чечевицы из крупнейшей компании-экспортера чечевицы – ООО «Волгатрейд». Результаты представленного исследования охватывают 10-летний период (2015–2024). В процессе исследования были использованы данные Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор), научные публикации отечественных ученых по представленной теме. Выполнение работы осуществлялось с применением следующих методов:

1. Системный анализ. Метод в проводимом исследовании направлен на выявление многообразных типов связей в экспорте чечевицы из России и сведение их в целостную картину путем выявления в период 2015–2024 гг.:

- топ-10 российских портов (терминалов) по экспорту чечевицы;
- топ-10 стран-импортеров чечевицы из России;
- топ-10 компаний-экспортеров чечевицы;
- компаний-импортеров чечевицы от крупнейшего российского экспортера ООО «Волгатрейд».

2. Сравнение. Применялись два вида сравнения – сравнение с эталоном (определение максимального/минимального значения) и сравнение во времени (охватывает период 2015–2024 гг.) по следующим аспектам:

- топ-10 российских портов (терминалов) по экспорту чечевицы;
- топ-10 стран-импортеров чечевицы из России;
- топ-10 компаний-экспортеров чечевицы.

3. Обобщение. Этот метод теоретического исследования направлен на выделение общих признаков, присущих группе изучаемых предметов. В исследовании проведено следующее формирование групп:

- топ-10 российских портов (терминалов) по экспорту чечевицы;
- топ-10 стран-импортеров чечевицы из России;
- топ-10 компаний-экспортеров чечевицы;
- компании-импортеры чечевицы от крупнейшего российского экспортера ООО «Волгатрейд».

4. Интерпретация результатов – это процесс анализа и осмысления данных, полученных в ходе исследования. В исследовании процесс предполагает изучение закономерностей, тенденций и корреляций в данных с целью получения достоверных результатов и формулирования значимых выводов.

Результаты и обсуждение

Чечевица является одной из самых распространенных сельскохозяйственных культур, относящихся к семейству бобовых. Для эффективного возделывания чечевицы следует использовать сорта, включенные в Государственный реестр селекционных достижений для конкретного региона. Наиболее урожайные и имеющие обширный ареал распространения сорта чечевицы: Пензенская 14, Петровская 4/105, Петровская 6, Петровская зеленозерная, Петровская юбилейная, Веховская 1, Анфия (Петровская СОС); Веховская (ОООНПП «Агросемсервис»); Аида, Светлая, Рауза (ВНИИЗиКК); Даная, Красноградская, Надежда, Октава, Пикантная (РНИПТИ сорго и кукурузы); Донская (Донской ЗНИИСХ); Невеста, Любимая (Пензенский НИИСХ); Нива 95 (Алтайский НИИСХ) [7].

Научные исследования в области селекции способствуют выведению засухоустойчивых сортов чечевицы, адаптированных к российскому климату. В 2025 г., например, в Госреестр селекционных достижений, допущенных к использованию, планируют внести первый сорт чечевицы собственной селекции – классическую черную чечевицу ЭН Белуга [8, 9].

Для успешных и долговременных экспортных поставок любой продукции агропромышленного комплекса (АПК), в том числе и чечевицы, необходимо соблюдать требования, регламентирующие условия выпуска продукции в обращение как в стране отправления, так и для страны-импортера. Чечевица как продукция подпадает под классификацию группы кодов ТН ВЭД 0713400000. В Российской Федерации согласно документам, принятым на межгосударственном и государственном уровнях, данный товар подлежит государственному фитосанитарному контролю (надзору) по линии Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор) [10].

Экспорт чечевицы из России берет свое начало с 2012 г. Тогда ее доля в структуре экспорта по культурам (бобовые, зерновые, масличные) составляла 2,09 % (11,5 тыс. т). Лидерство одержал горох – 71,43 % (393,4 тыс. т), почетное второе место было за нутом – 26,48 % (145,8 тыс. т).

В 2015 г. насчитывалось 6 портов, экспортирующих чечевицу. В 2023 г. таких портов было 14, а в 2024 г. – 11. В табл. 1 представлены топ-10 портов (терминалов) России по экспорту чечевицы. Лидирует терминал Новороссийска, доля экспорта чечевицы через который составила 37,5 % (2015), 52,6 % (2023), 25,5 % (2024). Несмотря на явное лидерство терминала Новороссийска в 2023 г., в 2024 г. по объему экспорта чечевицы он оказался практически на равных с терминалом Высоцка (доля экспорта 25,3 %), и терминал Азова, занимая третью позицию рейтинга, отстал совсем немного с экспортной долей чечевицы 22,5 %. Исследование за 10-летний период показывает, что терминал Новороссийска является лидером по экспорту чечевицы четвертый год подряд (с 2021 г.) и был также лидером в 2018–2019 гг. с объемом экспорта 24,9 тыс. т и 75,9 тыс. т соответственно. В 2016–2017 гг. лидировал по экспорту чечевицы терминал Ейска, объем экспорта чечевицы которого составлял 7,9 тыс. т (2016) и 55,5 тыс. т (2017). В 2020 г. лидировали отгрузки чечевицы по железной дороге (RAILWAY) с объемом экспорта чечевицы в размере 72,3 тыс. т.

Таблица 1

Топ-10 портов (терминалов) России по экспорту чечевицы
(составлено автором по данным Logistic Operating System [6])

01.01.2015–31.12.2015			01.01.2023–31.12.2023			01.01.2024–31.12.2024		
Порт (терминал)	Экс- порт, тыс. т	%	Порт (терминал)	Экс- порт, тыс. т	%	Порт (терминал)	Экс- порт, тыс. т	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Новорос- сийск	2,2	37,5	Новорос- сийск	122,2	52,6	Новорос- сийск	26,8	25,5
Железная дорога	1,8	30,8	Азов	36,4	15,7	Высоцк	26,6	25,3
Автодо- рога	1,1	18,4	Автодо- рога	20,9	9,0	Азов	23,6	22,5
Н/д	0,5	9,0	Железная дорога	18,6	8,0	Ростов- на-Дону	8,7	8,2
Духов- ницкое	0,2	3,8	Ростов- на-Дону	15,7	6,8	Таганрог	7,4	7,0
Азов	0,02	0,4	Ейск	7,6	3,3	Темрюк	4,6	4,4
			Камышин	3,4	1,5	Ейск	3,0	2,9
			Волго- донск	3,0	1,3	Железная дорога	2,7	2,6
			Орлов- ское	2,9	1,2	Автодо- рога	1,5	1,4
			Калач- на-Дону	1,6	0,7	Санкт- Петер- бург	0,4	0,4
ИТОГО	5,8	100,0	ИТОГО	232,4	100,0	ИТОГО	105,2	100,0

Причина резкого появления в 2024 г. на втором месте порта Высоцк, ранее не фигурировавшего, кроется в открытии в конце апреля 2023 г. первого на

Балтике зернового терминала в порту Высоцк (см. табл. 1). Развитие экспорта из порта Высоцк представляется перспективным с учетом растущих урожаев и излишков зерна в Центрально-Черноземном регионе, а также западной части Поволжья; проблем с поставками на внешние рынки, которые испытывают Западная Сибирь и Казахстан при экспорте через Россию [11].

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что в 2015, 2023 и 2024 гг. лидерство среди топ-10 стран-импортеров чечевицы России принадлежит Турции, импортные доли которой составили: 51,8 % (2015), 56,1 % (2023), 65,6 % (2024) (табл. 2) [12]. На Ближнем Востоке спрос на чечевицу прежде всего обусловлен традицией потребления данного продукта. Ведущим игроком рынка чечевицы данного региона является Турция, которая занимает четвертое место в мире по объемам производства. Дополнительный спрос на чечевицу формируется за счет ее полезных свойств и отсутствия глютена, что стало особенно важно после пандемии, когда потребители стали более внимательно относиться к своему питанию [10]. Однако, по данным исследований за 10-летний период, так было не всегда – в 2020 г. Турция уступила лидирующую позицию Латвии (импорт чечевицы – 66,8 тыс. т), оказавшись на 2-м месте (импорт чечевицы – 16,4 тыс. т).

Таблица 2

Топ-10 стран-импортеров чечевицы России
(составлено автором по данным Logistic Operating System [6])

01.01.2015–31.12.2015			01.01.2023–31.12.2023			01.01.2024–31.12.2024		
Страна-импортер	Импорт, тыс. т	%	Страна-импортер	Импорт, тыс. т	%	Страна-импортер	Импорт, тыс. т	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Турция	2,9	51,8	Турция	123,9	56,1	Турция	68,2	65,6
Азербайджан	0,9	15,9	Индия	44,6	20,2	ОАЭ	12,2	11,7
Таджикистан	0,5	9,6	ОАЭ	16,5	7,5	Пакистан	8,6	8,3
Болгария	0,4	6,9	Пакистан	13,5	6,1	Индия	6,9	6,6
Латвия	0,3	4,8	Египет	5,3	2,4	Египет	4,9	4,7
Венгрия	0,2	4,1	Чехия	4,9	2,2	Алжир	1,2	1,2
Германия	0,1	1,9	Азербайджан	4,6	2,1	Чехия	0,7	0,7
Иран	0,1	1,9	Алжир	3,4	1,6	Испания	0,6	0,6
Сербия	0,1	1,8	Сербия	2,2	1,0	Азербайджан	0,4	0,4
ОАЭ	0,1	1,2	Латвия	1,6	0,7	Германия	0,3	0,3
ИТОГО	5,6	100,0	ИТОГО	220,5	100,0	ИТОГО	104,0	100,0

Несмотря на лидерство по объемам импорта чечевицы в рейтинге топ-10 стран, чечевица все еще не является основным импортным товаром для Турции, хотя и набирает с каждым годом свою значимость. В разрезе импорта Турции по видам продукции (бобовые, зерновые, масличные) чечевица находится на 17-м месте (0,06 % от импорта (2015)), на 7-м месте (1,01 % от импорта (2023)), на 6-м месте (1,01 % от импорта (2024)).

Важно отметить значимых импортеров российской чечевицы: Индию, ОАЭ, Пакистан. В Индию началом пробных поставок чечевицы из России под контролем Россельхознадзора отмечен 2022 г. По результатам проведенных индийскими специалистами лабораторных исследований выявлено соответствие требованиям всех партий российской чечевицы, что стало залогом для продолжения поставок. 25 сентября 2024 г. произошло важное событие, ставшее результатом многолетних усилий и согласований между Россией и Индией, направленных на расширение аграрного сотрудничества между двумя странами, – Россия официально получила право на регулярные поставки чечевицы в Индию [13]. В 2023 г. Россия резко нарастила экспорт агропромышленной продукции в Объединенные Арабские Эмираты, чечевица не стала исключением. Несмотря на то, что доля России в общем объеме продовольственного импорта ОАЭ невелика, российские компании в последние годы проявляют все больший интерес к этому рынку [14]. Что касается экспорта российской чечевицы Пакистаном, то очевидны временные сложности в расчетах. В октябре 2024 г. Россия и Пакистан запустили механизм бартерной торговли агропродукцией. Российская компания «Астарта-Агротрейдинг» будет экспортировать нут и чечевицу в обмен на мандарины и рис из Пакистана [15].

В качестве перспективных направлений для российских поставок чечевицы, по мнению экспертов, можно рассматривать такие страны с высоким спросом, как Индия, Бангладеш, ОАЭ, Пакистан, Египет [16]. Перспективность поставок в Египет уже подтверждается подписанным 4 декабря 2024 г. на международной выставке «Фуд Африка 2024» в Каире Соглашением о поставках красной чечевицы в Египет (компания «Энерджи гейт») агропредприятием Ростовской области ООО ПКФ «Маяк» [17]. В марте 2024 г. между Внешнеэкономическим объединением «Продинторг» Минсельхоза России и Государственной торговой корпорацией Бангладеш был подписан меморандум о взаимопонимании, который охватывает экспорт в Республику Бангладеш товаров первой необходимости, в том числе куркумы, чечевицы, нута, подсолнечника и растительных масел [18].

Ключевой экспортер чечевицы четвертый год подряд (с 2021 г.) – VOLGATRADE (Компания ООО «Волгатрейд» (образована в 2001 г.), главный офис в г. Саратове). Компания охватывает 55 регионов России, насчитывает 6 филиалов в городах: Азове, Саратове, Новороссийске, Волгограде, Барнауле, Санкт-Петербурге. Стратегически выгодное расположение филиалов позволяет закупать продукцию во всех плодородных регионах России. Отгрузка производится любыми видами транспортировки: автотранспортом, ж/д вагонами, судами класса «река-море», контейнерами. В целях оперативного экспорта продукции ООО «Волгатрейд» задействует шесть портов (терминалов) по всей стране: Азов, Ростов-на-Дону, Новороссийск, Кавказ, Саратов, Санкт-Петербург [19].

За 10-летний период рейтинговые позиции ООО «Волгатрейд» постоянно менялись. Так, в 2016 г. компания была на 7-м месте с объемом экспорта чечевицы 0,9 тыс. т. В 2017 г. она занимала 2-ю позицию рейтинга с показателем экспорта чечевицы 13,1 тыс. т. В 2018 г. компания была на третьей позиции рейтинга (6,4 тыс. т). В 2019 г. ООО «Волгатрейд» сместилась на 5-ю строчку рейтинга (4,9 тыс. т). В 2020 г. ООО «Волгатрейд» вновь поднялась

в рейтинге, заняв 2-е место (5,7 тыс. т). В 2021 г. (13,0 тыс. т) и 2022 г. (25,0 тыс. т) ООО «Волгатрейд» уверенно заняла 1-е место по объемам экспорта чечевицы и удерживает его по настоящее время.

В 2023 г. ООО «Волгатрейд» осуществила 56 отгрузок чечевицы в 8 стран: Турция (36), Индия (7), Египет (4), Алжир (3), ОАЭ (3), Израиль (1), Иордания (1), Пакистан (1). В 2024 г. как состав стран-импортеров российской чечевицы от компании ООО «Волгатрейд», так и количество отгрузок чечевицы, существенно сократились. Так, в 2024 г. было осуществлено 18 поставок чечевицы в 3 страны: Турцию (12), Индию (5), Алжир (1). В 2015 г. ООО «Волга-трейд» принадлежало 4-е место и экспорт чечевицы осуществлялся только в Турцию (3 отгрузки). Компания ГК «АГРОЭКО» в 2015 г. занимала 1-ю позицию рейтинга экспортеров чечевицы из России, экспортировав ее в Турцию через порт Новороссийска (1 отгрузка) (табл. 3).

Таблица 3

Топ-10 экспортеров чечевицы России (главные грузоотправители)
(составлено автором по данным Logistic Operating System [6])

01.01.2015–31.12.2015			01.01.2023–31.12.2023			01.01.2024–31.12.2024		
Экс- портер	Экс- порт, тыс. т	%	Экс- портер	Экс- порт, тыс. т	%	Экс- портер	Экс- порт, тыс. т	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ГК «АГРО- ЭКО»	0,8	17,1	ООО «Волга- трейд»	15,6	18,3	ООО «Волга- трейд»	20,9	23,9
ООО «АГТ» (AGT)	0,6	13,7	ООО «Эко- Нива- Семена»	15,5	18,2	ИХА-НТО (Торговая марка ЕС)	19,0	21,7
ООО «Виртум»	0,6	13,1	ООО «Фру- тимпэкс»	11,6	13,6	ООО «Эко- Нива- Семена»	14,8	16,9
ООО «Волга- трейд»	0,5	11,5	Н/д	7,6	8,9	Н/д	8,5	9,7
ООО «Листеко»	0,5	10,9	ООО «Топ Грейн Л.Т.Д.»	6,5	7,6	ООО НПХ «АМАРА НТАГРО»	7,4	8,4
ООО «ПРОДУК ТСЕРВИС»	0,4	9,2	ООО «Зерно- вые Ли- нии»	6,1	7,2	ООО «Агро Зер- но Юг»	5,6	6,4
ООО «СПСАГРО- ТОРГ»	0,3	7,7	ООО «Орако»	6,0	7,0	ООО «Кти- Сибирь»	3,3	3,7
ООО «Галакси»	0,3	7,6	ООО «Пилсан»	5,9	7,0	ООО «Зерновые Линии»	3,1	3,6

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ООО «Продторг»	0,2	4,6	ООО «До-ставка морем»	5,4	6,3	ООО «АРМА»	2,8	3,2
ООО «Сиб-ресурс»	0,2	4,6	ООО «Агро Альянс Ростов»	5,0	5,8	ООО «Фру-тимпэкс»	2,3	2,6
ИТОГО	4,4	100,0	ИТОГО	85,2	100,0	ИТОГО	87,7	100,0

По количеству предприятий-импортеров чечевицы из Компании ООО «Волгатрейд» в 2024 г. страны-импортеры распределились следующим образом: Индия (5), Турция (2), Алжир (1) (табл. 4).

Таблица 4

Предприятия-импортеры чечевицы крупнейшего предприятия-экспортера – ООО «Волгатрейд» – по странам за период 01.01.2024–31.12.2024 (составлено автором по данным Logistic Operating System [6])

Страна-импортер (количество предприятий-импортеров)	Предприятия-импортеры
Индия (5)	BASHAN AGRO GIDA SAN. VE TIC AS, OMSP COLUMBUS & PARTNERS, MOORTHY TRADERS, VASUMATHY TRADERS, C.P. FOODS
Турция (2)	BASHAN TARIMSAL URUN PAZ SAN DIS TIC, BASHAN AGRO GIDA SAN. VE TIC AS
Алжир (1)	SARL ILA FOOD

Экспорт чечевицы из России имеет ряд выгод и перспектив, что подтверждается аналитикой и прогнозами. Экспорт чечевицы приносит России следующие преимущества: рост объемов экспорта (в 2023 г. экспорт чечевицы из РФ без учета отгрузок в страны ЕАЭС и Иран составил 244,3 тыс. т, что в 3,1 раза больше, чем в 2022 г. В январе – мае 2024 г. экспорт незначительно снизился – на 8,1 % до 47,7 тыс. т, но при сравнении с показателями за аналогичный период двухлетней давности отмечается рост в 2,0 раза) [20]; рентабельность производства (чечевица считается высокомаржинальной культурой, которая остается рентабельной для производства, даже несмотря на значительное снижение закупочных цен (например, по состоянию на 1 октября 2023 г. рентабельность выращивания зернобобовых составила 24 %, что почти в 8,5 раз выше показателя по пшенице)) [2]; востребованность продукции на международном рынке (основными покупателями российской чечевицы являются Турция, Индия и Иран, в крупных объемах поставки также осуществляются в ОАЭ, Пакистан и Египет) [21]; перспективы для российских фермеров и производителей (как стимул для увеличения производства и развития сельскохозяйственного сектора в стране); укрепление экономики России (рост экспорта как сельскохозяйственной продукции в целом и чечевицы в частности способствует улучшению позиций страны на мировой арене) [21]. Прогнозы:

аналитики Минсельхоза полагают, что к 2030 г. объем поставок чечевицы может превысить 180–200 тыс. т, или 140–160 млн долл. Ожидается, что к этому времени спрос на чечевицу вырастет еще на 25–30 % из-за популяризации здорового питания и устойчивого сельского хозяйства по всему миру.

Российский бизнес активно ищет новые векторы внешнеэкономической деятельности, которые требуют развития инновационных направлений международного экономического сотрудничества, стимулирования отечественных производителей и создания замкнутых цепочек формирования стоимости. Санкции существенно ограничивают внешнеэкономическую деятельность российских компаний [22]. В целях дальнейшего развития отечественного экспорта важно решение следующих задач: расширение географии поставок, развитие логистики и дистрибуции, открытие представительств за рубежом, создание брендов под конкретные рынки, сотрудничество с зарубежными сетями и индустрией HoReCa, адаптация продукции под религиозные требования, обеспечение устойчивости поставок и долгосрочного присутствия российских компаний на целевых рынках [23].

Стратегия развития внешнеэкономической деятельности Российской Федерации в целом и отдельных регионов в частности содержит несколько общих векторов развития: импортозамещение на базе формирования и поддержания технологического суверенитета и стимулирования экспорта несырьевых неэнергетических товаров [24]. Перечень инструментов государственной поддержки экспорта достаточно стандартный: льготное кредитование, субсидирование реализации отдельных операций по организации экспорта готовой продукции, административная поддержка по выходу на новые зарубежные рынки.

Заключение

Таким образом, осуществление регулярных поставок чечевицы открывает новые горизонты для отечественной аграрной отрасли. Данное обстоятельство не только способствует развитию сельскохозяйственного производства в России, но и повышает экспортный потенциал. Производителям гарантируется уверенность в стабильности рынков сбыта, что, в свою очередь, влияет на рост качества продукции и стимулирует инвестиции в технологии.

Среди важных условий развития российского экспорта чечевицы можно выделить:

1. Выход на новые рынки (расширение присутствия на существующих). Перспективными направлениями для поставок чечевицы считаются, например, Индия, Бангладеш, ОАЭ, Пакистан, Египет. Выход российской чечевицы на рынки Индии, Бангладеша, ОАЭ, Пакистана и Египта подкреплён соответствием российской продукции фитосанитарным требованиям этих стран.

2. Устойчивый спрос на импортную чечевицу. Для роста экспорта важны сохранение спроса на продукт и поддержание возможностей России по наращиванию его производства в необходимых объемах.

3. Подготовка пакета необходимых документов. При экспорте чечевицы необходимы внешнеэкономический контракт, инвойс, фитосанитарный сертификат и другие сопроводительные документы.

4. Соблюдение требований фитосанитарного контроля. Согласно Постановлению Правительства РФ от 30 июня 2021 г. № 1079 чечевица является

объектом федерального государственного контроля (надзора) в области обеспечения качества и безопасности зерна и продуктов переработки зерна. Некоторые меры контроля: оформление фитосанитарного сертификата (документ обязателен для вывоза установленного перечня продукции растительного происхождения); контроль соответствия показателям безопасности (чечевица и используемая для нее упаковка должны соответствовать требованиям технических регламентов, действующих на территории ЕАЭС); определение состояния продукции в каждой партии (проверяется запах, цвет, влажность, содержание сорной и зерновой примесей, зараженность вредителями); оформление товаросопроводительных документов (каждая партия чечевицы должна сопровождаться такими документами). Необходимо выполнять обязательные требования страны-импортера и контрактные условия.

5. Логистические решения. Важна безупречная логистическая организация для экспорта чечевицы на сложные зарубежные рынки. Решения, которые используют, например, для поставок в дальние направления: железнодорожные поставки (это значимо, в частности, для Китая, где критически важны стабильность и скорость поставок); учет климатических условий (для чечевицы разрабатывают цепочки с контролем температуры на каждом этапе); сегментация подхода (чечевица требует особых условий хранения и транспортировки, особенно премиальная зеленая чечевица, где повышенные требования к влажности и качеству сохраняются вплоть до конечного покупателя).

6. Механизмы господдержки. По прогнозам Министерства сельского хозяйства РФ, с каждым годом в стране будут расти посевные площади под чечевицу. Этому будут способствовать, в частности, государственные программы по развитию производства зернобобовых культур. Важны научные исследования по выведению засухоустойчивых сортов чечевицы, адаптированных к российскому климату.

7. Маркетинговые стратегии. Полезно проводить маркетинговые исследования, которые включают анализ мировых тенденций, потребления и производства чечевицы, продовольственного баланса и динамики цен, а также глобальную торговлю (импорт и экспорт). Такие исследования помогают получить полную картину мирового рынка, понять текущие рыночные тенденции, оценить будущие рыночные перспективы, определить ключевые факторы успеха на рынке чечевицы.

В целом при условии сохранения положительных тенденций динамики мирового импорта, выстраивания правильной логистики и обеспечения необходимого роста отечественного производства чечевицы наращивание российского экспорта чечевицы будет продолжено.

Список литературы

1. Чечевица // Bashan. URL: <https://www.bashan.com.tr/mercimek> (дата обращения: 04.01.2025).
2. Какие тренды наметились на рынке чечевицы? // DIRECT.FARM. 28.06.2024. URL: <https://direct.farm/post/kakiye-trendy-nametilis-na-rynke-chechevitsy-22882> (дата обращения: 04.01.2025).
3. Российские аграрии значительно увеличили поставки чечевицы на экспорт // AGROXXI. 29.11.2023. URL: <https://www.agroxxi.ru/analiz-rynka-selskohozjaistvennyh-tovarov/rossiiskie-agrarii-znachitelno-uvelichili-postavki-chechevicy-na-yeksport.html> (дата обращения: 04.01.2025).

4. Под контролем специалистов Новороссийского филиала на экспорт отправлено чечевицы в 5 раз больше, чем в прошлом году // Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса». 29.11.2023. URL: <https://fczerna.ru/news/?NAME=pod-kontrolem-spetsialistov-novorossiyskogo-filiala-na-eksport-otpravleno-chechevitsy-v-5-raz-bolshe> (дата обращения: 04.01.2025).
5. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : указ Президента России. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/73986> (дата обращения: 04.12.2024).
6. Logistic Operating System. URL: <https://logistics.org/?ysclid=m4mylqc57j351550444> (дата обращения: 13.12.2024).
7. Романова И. Н., Глушаков С. Н., Башмаков А. А. Зерновые бобовые культуры. Смоленск : ФГБОУ ВО «Смоленская государственная сельскохозяйственная академия», 2016. С. 47.
8. Маслова Г. А., Асташов А. Н. Селекционная ценность сортообразцов чечевицы // Теория и практика современной аграрной науки : сб. VII нац. (всерос.) науч. конф. с междунар. участием (Новосибирск, 26 февраля 2024 г.). Новосибирск : ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2024. С. 143–147.
9. Маслова Г. А., Родина Т. В. Особенности корреляционных взаимосвязей сортообразцов чечевицы // Селекция сельскохозяйственных растений и совершенствование технологии их возделывания : материалы междунар. науч.-практ. конф., (Иркутск, 27 февраля 2024 г.). Иркутск : Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, 2024. С. 87–92.
10. Чечевица // Агроэкспорт. 11.04.2023. URL: <https://clck.ru/3LjBVX> (дата обращения: 04.01.2025).
11. В порту Высоцк заработал первый на Балтике зерновой терминал // Агроинвестор. 28.04.2023. URL: <https://www.agroinvestor.ru/regions/news/40220-v-portu-vysotsk-zarabotal-pervyy-na-baltike-zernovoy-terminal/> (дата обращения: 04.01.2025).
12. Нут, горох и чечевица стали рекордсменами по экспорту // ФНЦ Агроэкологии РАН. 26.01.2024. URL: <https://vfanc.ru/nut-goroh-i-chechevica-stali-rekordsmenami-po-eksportu/> (дата обращения: 04.01.2025).
13. Россия и Индия: новый этап в торговле чечевицей // Рынок зерна info. 26.09.2024. URL: <https://graininfo.ru/news/rossiya-i-indiya-novyy-etap-v-torgovle-chechevitsey/> (дата обращения: 04.01.2025).
14. Россия резко нарастила поставки агропродукции в одну страну // LENTA.RU. 19.02.2024. URL: <https://lenta.ru/news/2024/02/19/rossiya-v-razu-narastila-postavki-agroproduktii-v-odnu-stranu/> (дата обращения: 04.01.2025).
15. Россия и Пакистан запустили механизм бартерной торговли в сфере АПК // Сфера медиа. 03.10.2024. URL: <https://sfera.fm/news/import-eksport/rossiya-i-pakistan-zapustili-mekhanizm-barternoi-torgovli-v-sfere-apk> (дата обращения: 04.01.2025).
16. Потенциал роста на 57,5 % имеет экспорт чечевицы из РФ // Аграрная наука. 14.04.2023. URL: <https://agrarnayanauka.ru/potenczial-rosta-na-575-imeet-eksport-che/> (дата обращения: 04.01.2025).
17. Предприятия Ростовской области расширили поставки агропродукции в Египет // Комсомольская правда. 04.12.2024. URL: <https://www.rostov.kp.ru/online/news/6122277/> (дата обращения: 04.01.2025).
18. Бангладеш становится перспективным рынком для зерновых и зернобобовых из России // Агроэксперт. 13.08.2024. URL: <https://agroexpert.press/eksport-import/bangladesh-stanovitsya-perspektivnym-rynkom-dlya-zernovyh-i-zernobobovyh-iz-rossii> (дата обращения: 04.01.2025).
19. VOLGATRADE. URL: <https://volgatrade.net/contacts> (дата обращения: 13.12.2024).
20. Российский рынок чечевицы – ключевые тенденции // Экспертно-аналитический центр агробизнеса. URL: <https://ab-centre.ru/news/rossiyskiy-rynok-chechevicy---klyuchevye-tendencii> (дата обращения: 19.05.2025).

21. Российская чечевица: растущий экспорт и новые перспективы // Рынок зерна info. 06.03.2024. URL: <https://graininfo.ru/news/rossiyskaya-chechevitsa-rastushchiy-eksport-i-novye-perspektivy-oldgran/> (дата обращения: 04.01.2025).
22. Храмченко А. А., Хорольская Т. Е., Глебов Г. А., Малыгина К. Д. Необходимость и возможность изменения структуры российского импорта и экспорта // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. № 1 (51). С. 261–265. EDN: KNHQHN
23. Полунина Н. Ю. Экспорт как драйвер развития АПК Российской // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2024. Т. 14, № 3. С. 162–172. doi: 10.21869/2223-1552-2024-14-3-162-172 EDN: JGPIMA
24. Колодина О. Н. Стимулирование развития несырьевого экспорта: механизмы и стратегия развития // Вестник Академии знаний. 2024. № 4 (63). С. 215–220. EDN: XHOYPF

References

1. Lentil. *Bashan*. (In Russ.). Available at: <https://www.bashan.com.tr/mercimek> (accessed 04.01.2025).
2. What are the trends in the lentil market? *DIRECT.FARM*. 28.06.2024. (In Russ.). Available at: <https://direct.farm/post/kakiye-trendy-nametilis-na-rynke-chechevitsy-22882> (accessed 04.01.2025).
3. Russian farmers have significantly increased the supply of lentils for export. *AGROXXI*. 29.11.2023. (In Russ.). Available at: <https://www.agroxxi.ru/analiz-rynka-selskoho-zhajtvennyh-tovarov/rossiiskie-agrarii-znachitelno-velichili-postavki-chechevicy-na-yeksport.html> (accessed 04.01.2025).
4. Under the supervision of specialists from the Novorossiysk branch, 5 times more lentils were exported than last year. *Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie «Federal'nyy tsentr otsenki bezopasnosti i kachestva produktsii agropromyshlennogo kompleksa» = Federal State Budgetary Institution "Federal Center for Assessment of safety and quality of products of the agro-industrial complex"*. 29.11.2023. (In Russ.). Available at: <https://fczerna.ru/news/?NAME=pod-kontrolem-spetsialistov-novorossiyskogo-filiala-na-eksport-otpravleno-chechevitsy-v-5-raz-bolshe> (accessed 04.01.2025).
5. *O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda: ukaz Prezidenta Rossii = On the national development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036: Decree of the President of Russia*. (In Russ.). Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/73986> (accessed 04.12.2024).
6. *Logistic Operating System*. Available at: <https://logistics.org/?ysclid=m4mylqc57j351550444> (accessed 13.12.2024).
7. Romanova I.N., Glushakov S.N., Bashmakov A.A. *Zernovye bobovye kul'tury = Grain legumes*. Smolensk: FGBOU VO «Smolenskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya», 2016:47. (In Russ.)
8. Maslova G.A., Astashov A.N. Breeding value of lentil cultivars. *Teoriya i praktika sovremennoy agrarnoy nauki: sb. VII nats. (vseros.) nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem (Novosibirsk, 26 fevralya 2024 g.) = Theory and practice of modern agrarian science : collection of VII National (all-Russian) scientific conference with international participation (Novosibirsk, February 26, 2024)*. Novosibirsk: ITs NGAU «Zolotoy kolos», 2024:143–147. (In Russ.)
9. Maslova G.A., Rodina T.V. Features of correlational relationships of lentil variety samples. *Selektsiya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy i sovershenstvovanie tekhnologii ikh vozdeystviya: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Irkutsk, 27 fevralya 2024 g.) =*

- Breeding of agricultural plants and improvement of their cultivation technology : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, (Irkutsk, February 27, 2024).* Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. A.A. Ezhevskogo, 2024:87–92. (In Russ.)
10. Lentil. *Agroekspert* = *Agroexpert*. 11.04.2023. (In Russ.). Available at: <https://clck.ru/3LjBVX> (accessed 04.01.2025).
 11. The first grain terminal in the Baltic Sea has been opened in the port of Vysotsk. *Agroinvestor* = *Agroinvestor*. 28.04.2023. (In Russ.). Available at: <https://www.agroinvestor.ru/regions/news/40220-v-portu-vysotsk-zarabotal-pervyy-na-baltike-zernovoy-terminal/> (accessed 04.01.2025).
 12. Chickpeas, peas and lentils have become export record holders. *FNTs Agroekologii RAN* = *Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences*. 26.01.2024. (In Russ.). Available at: <https://vfanc.ru/nut-goroh-i-chechevica-stalirekordsmenami-po-eksportu/> (accessed 04.01.2025).
 13. Russia and India: a new stage in the lentil trade. *Rynok zerna info* = *Grain market info*. 26.09.2024. (In Russ.). Available at: <https://graininfo.ru/news/rossiya-i-indiya-novy-etap-v-torgovle-chechevitsey/> (accessed 04.01.2025).
 14. Russia has dramatically increased the supply of agricultural products to one country. *LENTA.RU*. 19.02.2024. (In Russ.). Available at: <https://lenta.ru/news/2024/02/19/rossiya-v-razu-narastila-postavki-agroproduktov-v-odnu-stranu/> (accessed 04.01.2025).
 15. Russia and Pakistan have launched a mechanism for barter trade in the agricultural sector. *Sfera media* = *The media sphere*. 03.10.2024. (In Russ.). Available at: <https://sfera.fm/news/import-eksport/rossiya-i-pakistan-zapustili-mekhanizm-barternoi-torgovli-v-sfere-apk> (accessed 04.01.2025).
 16. The export of lentils from the Russian Federation has a 57.5% growth potential. *Agrarnaya nauka* = *Agricultural science*. 14.04.2023. (In Russ.). Available at: <https://agrarnayanauka.ru/potenczial-rosta-na-575-imeet-eksport-che/> (accessed 04.01.2025).
 17. Enterprises of the Rostov region have expanded the supply of agricultural products to Egypt. *Komsomol'skaya pravda* = *Komsomolskaya Pravda*. 04.12.2024. (In Russ.). Available at: <https://www.rostov.kp.ru/online/news/6122277/> (accessed 04.01.2025).
 18. Bangladesh is becoming a promising market for grains and legumes from Russia. *Agroekspert* = *Agroexpert*. 13.08.2024. (In Russ.). Available at: <https://agroexpert.press/eksport-import/bangladesh-stanovitsya-perspektivnym-rynkom-dlya-zernovyyh-i-zernobobovyh-iz-rossii> (accessed 04.01.2025).
 19. *VOLGATRADE*. Available at: <https://volgatrade.net/contacts> (accessed 13.12.2024).
 20. The Russian lentil market – key trends. *Ekspertno-analiticheskiy tsentr agrobiznesa* = *Agribusiness Expert and Analytical Center*. (In Russ.). Available at: <https://ab-centre.ru/news/rossiyskiy-rynok-chechevicy---klyuchevye-tendencii> (accessed 19.05.2025).
 21. Russian lentils: growing exports and new prospects. *Rynok zerna info* = *Grain market info*. 06.03.2024. (In Russ.). Available at: <https://graininfo.ru/news/rossiyskaya-chechevitsa-rastushchiy-eksport-i-novye-perspektivy-oldgran/> (accessed 04.01.2025).
 22. Khrumchenko A.A., Khorol'skaya T.E., Glebov G.A., Malykhina K.D. The need and possibility of changing the structure of Russian imports and exports. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya* = *Natural Sciences and humanities research*. 2024;(1):261–265. (In Russ.)
 23. Polunina N.Yu. Export as a driver of the development of the Russian agro-industrial complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment* = *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Economics. Sociology. Management*. 2024;14(3):162–172. (In Russ.). doi: 10.21869/2223-1552-2024-14-3-162-172
 24. Kolodina O.N. Stimulating the development of non-primary exports: mechanisms and development strategy. *Vestnik Akademii znaniy* = *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024;(4):215–220. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Наталья Юрьевна Полунина

старший научный сотрудник отдела
экономики АПК и агропродовольственных
рынков,
Научно-исследовательский институт
экономики и организации
агропромышленного комплекса
Центрально-Черноземного района –
филиал Воронежского федерального
аграрного научного центра имени
В. В. Докучаева
(Россия, г. Воронеж, ул. Серафимовича,
26а)
E-mail: nata-pol0801@yandex.ru

Natalya Yu. Polunina

Senior researcher of agro-industrial
complex economics and agri-food markets,
Research Institute of Economics
and Organization of Agro-Industrial
Complex of Central Black Earth Region –
branch of Voronezh Federal Agricultural
Scientific Centre named after
V.V. Dokuchaev,
(26a Serafimovich street, Voronezh, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 24.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 19.05.2025

Принята к публикации/Accepted 26.05.2025

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 519.852
doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-6

УЧЕТ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОШИБОК ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО- ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

С. И. Носков¹, С. В. Беляев², Ю. А. Бычков³

^{1,2,3} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия
¹sergey.noskov.57@mail.ru, ²bsv2001@list.ru, ³nik24-11@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработку математических моделей сложных объектов принято сопровождать анализом их допустимости с привлечением как строгих формальных критериев и процедур, так и различных эвристических приемов. Это касается моделей любых типов, в том числе регрессионных. Целью исследования является разработка алгоритмического способа идентификации параметров кусочно-линейной регрессионной модели Леонтьева, обладающей максимальным числом допустимых ошибок аппроксимации. Это число может являться одним из критериев оценки адекватности (допустимости) регрессионных моделей. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели применялся математический аппарат решения задач линейно-булева программирования. *Результаты.* Сформулированная задача сведена к задаче линейно-булева программирования приемлемой для реальных объектов размерности. *Выводы.* Описанный в работе подход позволяет обеспечить требуемый уровень допустимости ошибок аппроксимации кусочно-линейной регрессионной модели. Построена адекватная регрессионная модель алюминиевой промышленности Российской Федерации.

Ключевые слова: кусочно-линейная регрессионная модель, метод наименьших модулей, функция потерь, задача линейно-булева программирования, производство алюминия

Для цитирования: Носков С. И., Беляев С. В., Бычков Ю. А. Учет заданного уровня ошибок при оценивании параметров кусочно-линейной регрессионной модели // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 75–84. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-6

ACCOUNTING FOR A GIVEN ERROR LEVEL IN ESTIMATION OF PARAMETERS OF A PIECEWISE- LINEAR REGRESSION MODEL

S.I. Noskov¹, S.V. Belyaev², Yu.A. Bychkov³

^{1,2,3} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia
¹sergey.noskov.57@mail.ru, ²bsv2001@list.ru, ³nik24-11@mail.ru

Abstract. *Background.* The development of mathematical models of complex objects is usually accompanied by an analysis of their admissibility using both strict formal criteria and procedures, and various heuristic techniques. This applies to models of any type, including regression. The aim of the study is to develop an algorithmic method for identifying parameters of the Leontiev piecewise linear regression model with the maximum number of admissible approximation errors. This number can be one of the criteria for assessing the adequacy (admissibility) of regression models. *Materials and methods.* To achieve the stated goal, the mathematical apparatus for solving linear Boolean programming problems was used. *Results.* The formulated problem is reduced to a linear Boolean programming problem of a dimension acceptable for real objects. *Conclusions.* The approach described in the work allows for an acceptable level of admissibility of approximation errors in a piecewise linear regression model. An adequate regression model of the aluminum industry of the Russian Federation has been constructed.

Keywords: piecewise linear regression model, least absolute values method, loss function, linear Boolean programming problem, aluminum production

For citation: Noskov S.I., Belyaev S.V., Bychkov Yu.A. Accounting for a given error level in estimation of parameters of a piecewise-linear regression model. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):75–84. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-6

Введение

Разработку математических моделей сложных объектов принято сопровождать анализом их допустимости с привлечением как строгих формальных критериев и процедур, так и различных эвристических приемов. Это касается моделей любых типов, в том числе регрессионных. Так, в работе [1] исследуется широкое кластерное решение и показывается, что оно не является допустимым в некоторых моделях транспортных потоков. Для тех же моделей транспортных потоков, которые допускают такое решение, подробно обсуждается взаимосвязь между двумя важными параметрами управления и критическими плотностями, которые разделяют равновесное решение на устойчивые и неустойчивые области. В работе [2] рассматриваются проблемы асимптотической устойчивости, экспоненциальной устойчивости и допустимости для математической модели сингулярных систем с постоянным запаздыванием. При этом сингулярная система преобразуется в нейтральную дифференциальную систему. Получены некоторые достаточные условия устойчивости и допустимости решений новой нейтральной дифференциальной системы

с использованием интегральных неравенств, техники линейных матричных неравенств и содержательных функционалов Ляпунова – Красовского. В статье [3] рассматривается проблема асинхронной допустимости и обнаружения неисправностей для неявных марковских коммутационных систем с переменной задержкой в рамках скрытой модели. Основная цель – разработать асинхронный фильтр, чтобы такая система была стохастически допустимой (включая регулярную, безимпульсную и стохастически устойчивую допустимость) и имела приемлемое значение индекса производительности. Исследование [4] посвящено анализу восприятия студентами-математиками допустимости выводов, основанных на графических рассуждениях для доказательств исчисления. В работе [5] отмечается, что в иерархическом байесовском моделировании нормальных средних предварительную спецификацию обычно завершают, выбирая постоянную предварительную плотность для немоделируемых гиперпараметров (например, дисперсий и средних наивысшего уровня). При этом иерархические априорные вероятности для нормальных средних классифицируются с точки зрения допустимости и приемлемости результирующих оценок для довольно общего сценария.

В работе [6] рассматривается проблема допустимости среднего квадрата для класса стохастических сингулярных систем с переключением Пуассона. Доказывается эквивалентность между допустимостью среднего квадрата и надежной допустимостью детерминированной системы, что является расширением результата в этом случае. В исследовании [7] предлагается новое понятие допустимости в математическом моделировании финансовых рынков. Для функций полезности предлагается выделять минимальный набор простых стратегий при условиях, которые являются более мягкими, чем известное асимптотическое условие эластичности.

В статье [8] исследуется допустимость в двумерных сингулярных непрерывно-дискретных линейных системах, описываемых моделью Роессера. Выведены достаточные условия для существования контроллера обратной связи по состоянию, который гарантирует, что замкнутые системы являются допустимыми и надежно допустимыми. В исследовании [9] изучается модель линейной регрессии Гаусса (с неизвестными средним значением и дисперсией). Показывается, что стандартный доверительный набор для одного или двух коэффициентов регрессии допустим в смысле Джоши, что имеет важные последствия для производительности современных процедур вывода после выбора модели, особенно в ситуациях, когда число параметров больше длины выборки.

В работах [10, 11] используется понятие допустимой регрессионной модели – ее параметры должны быть согласованы с содержательным смыслом переменных, т.е. иметь соответствующие ему знаки, и, кроме того, значения критериев адекватности должны попадать в заданные диапазоны. К этим критериям, в частности, относятся: критерии Стьюдента, Фишера, множественной детерминации, смещения, Дарбина – Уотсона, Белсли – Ку – Велша, значения инфляционных факторов (для выявления мультиколлинеарности) и многие другие.

Интересные результаты, связанные с анализом допустимости математических моделей сложных систем, получены в работах [12] (анализ допустимости упрощения модели управления с запаздыванием при ее идентификации), [13] (задачи проверки допустимости и устранения особенностей входов арифметических выражений на основе эквивалентных преобразований представляющих

их полиномов), [14] (исследование допустимости равновесного моделирования необратимых процессов, явлений деградации и самоорганизации), [15] (проблемы алгоритмического распознавания допустимых правил вывода во временных многоагентных логиках), [16] (синтез ограниченных локально допустимых управлений динамического объекта, заданного стационарным нелинейным разностным оператором).

Целью настоящей работы является разработка алгоритмического способа идентификации параметров кусочно-линейной регрессионной модели Леонтьева, обладающей максимальным числом допустимых ошибок аппроксимации.

Материалы и методы

Рассмотрим кусочно-линейную регрессионную модель (функцию) Леонтьева (см., например, [17–19]):

$$y_k = \min \{a_1 x_{k1}, a_2 x_{k2}, \dots, a_m x_{km}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y – зависимая переменная; $x_i, i = \overline{1, m}$ – независимые переменные; $a_i, i = \overline{1, m}$ – оцениваемые параметры; $\varepsilon_k, k = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации; n – количество наблюдений (длина выборки данных). Все переменные в (1) детерминированы.

Модель (1) характерна в первую очередь тем, что значение выходной переменной определяется значением входного фактора, на котором сработал минимум, при этом увеличение других переменных не приводит к росту выходной переменной.

В работе [17] показано, что если определение оценок параметров модели (1) осуществляется по методу наименьших модулей (МНМ), т.е. минимизацией функции потерь

$$J(a) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k|, \quad (2)$$

то эту задачу можно свести к задаче линейно-булева программирования (ЛБП).

Действительно, введем следующие обозначения:

$$u_k = \begin{cases} \varepsilon_k, & \varepsilon_k > 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$v_k = \begin{cases} -\varepsilon_k, & \varepsilon_k < 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\sigma_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{если минимум в (1) для } k\text{-го наблюдения достигнут} \\ & \text{на } i\text{-й компоненте,} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$z_k = \min \{a_1 x_{k1}, a_2 x_{k2}, \dots, a_m x_{km}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}.$$

Легко видеть, что справедливы равенства:

$$\varepsilon_k = u_k - v_k, |\varepsilon_k| = u_k + v_k, u_k v_k = 0, k = \overline{1, n}.$$

Таким образом, задача минимизации функции (2) сводится к следующей задаче ЛБП:

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + \rho \sum_{i=1}^m a_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$z_k + u_k - v_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$z_k \leq a_i x_{ki}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$a_i x_{ki} - z_k + M\sigma_{ki} \leq M, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m \sigma_{ki} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\sigma_{ki} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, k = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Здесь M и ρ – заданные большая и малая положительные константы. Второе слагаемое в целевой функции (3) обеспечивает единственность решения задачи (3)–(9) [18, 19].

Пусть в качестве одного из критериев допустимости модели (1) выделено число ошибок аппроксимации, не превышающих некоторый заданный уровень d . Поставим задачу максимизации этого критерия для кусочно-линейной регрессии (1).

Результаты и обсуждение

Формально эта задача может быть поставлена следующим образом. Сформируем множество S :

$$S = \{k \in \{1, 2, \dots, n\} \mid |\varepsilon_k| \leq d\}.$$

Тогда задача максимизации числа допустимых ошибок аппроксимации для кусочно-линейной регрессии (1) может быть поставлена следующим образом:

$$|S| \rightarrow \max, \quad (10)$$

где $|S|$ – число элементов в множестве S .

Для решения задачи (10) применим прием, использованный в работе [20] при решении задачи максимизации числа допустимых ошибок аппроксимации линейной регрессионной модели.

Сформируем ограничения:

$$u_k + v_k + M\delta_k \leq M + d, k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$\delta_k \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Тогда задача (10) сводится к задаче ЛБП с ограничениями (4)–(9), (11), (12) и целевой функцией

$$-\sum_{k=1}^n \delta_k + \rho_1 \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + \rho \sum_{i=1}^m a_i \rightarrow \min, \quad (13)$$

где ρ_1 – малая положительная константа.

Эта задача имеет $4n + m(n + 1)$ переменных, из которых $n(m + 1)$ – булевы, и $2n(m + 1) + 1$ ограничений, не считая условий неотрицательности.

Применим описанный выше алгоритмический способ для построения кусочно-линейной модели алюминиевой промышленности Российской Федерации. Введем следующие обозначения:

y – производство первичного алюминия, тыс. т;

x_1 – производство глинозема, тыс. т;

x_2 – добыча бокситов, млн т.

В табл. 1 приведены значения выделенных показателей за 2007–2023 гг. [21–25].

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

y	x_1	x_2
4,202	11,347	18,5
4,424	11,317	19,1
3,946	7,278	11,3
4,083	7,84	11,8
4,123	8,154	13,5
4,173	7,477	12,4
3,857	7,31	11,9
3,601	7,253	12,1
3,645	7,402	12,1
3,685	7,536	12,2
3,707	7,773	11,6
3,753	7,774	13,9
3,757	7,858	16,1
3,755	8,182	14,8
3,764	8,304	15
3,835	5,953	12,3
3,848	5,134	13,4

Будем строить модель

$$y_k = \min\{a_1 x_{k1}, a_2 x_{k2}\} + \epsilon_k, \quad k = \overline{1, 17}. \quad (14)$$

Вначале построим ее с помощью МНМ путем решения задачи ЛБП (3)–(9):

$$y_k = \min\{0,49x_{k1}, 0,32x_{k2}\} + \epsilon_k, \quad k = \overline{1, 17}, \quad (15)$$

$$U = 7,107,$$

где

$$U = \sum_{k=1}^{17} |\varepsilon_k| = \sum_{k=1}^{17} (u_k + v_k).$$

Анализ модулей ошибок аппроксимации модели (15) показывает, что они располагаются на отрезке $[0, 1,34]$. Зададим допустимый уровень ошибок $d = 0,2$. Ему соответствуют 7 ошибок модели из 17, т.е. $|S| = 7$. Попытаемся увеличить это значение путем решения задачи ЛБП (4)–(9), (11), (12), (13). В результате получим модель

$$y_k = \min\{0,5x_{k1}, 0,3x_{k2}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,17}, \quad (16)$$

$$U = 7,349, |S| = 9.$$

Таким образом, при некотором росте (на 0,242, или на 3,4 %) суммы модулей ошибок модель (16) обладает девятью (увеличение на 2, или на 28,6 %) допустимыми значениями ошибок. При этом сами оценки параметров изменились весьма незначительно.

Заметим, что время решения задачи ЛБП (4)–(9), (11), (12), (13) с помощью специализированной программы LPsolve, размещенной в сети Интернет в свободном доступе, составило 0,5 с.

Заключение

В работе предложен алгоритмический способ максимизации числа допустимых модулей ошибок аппроксимации кусочно-линейной регрессионной модели, сводящийся к решению задачи линейно-булева программирования приемлемой для реальных объектов размерности. Построена кусочно-линейной модель алюминиевой промышленности Российской Федерации, в которой в качестве независимых переменных задействованы объемы производства глинозема и добычи бокситов.

Список литературы

1. Xu R.-Y., Zhang P., Dai S.-Q., Wong S. C. Admissibility of a Wide Cluster Solution in "Anisotropic" Higher-Order Traffic Flow Models // SIAM Journal on Applied Mathematics. 2007. Vol. 68. P. 562–573.
2. Yiğit A., Tun C. On the stability and admissibility of a singular differential system with constant delay // International Journal of Mathematics and Computer Science. 2020. Vol. 15. P. 641–660.
3. Zhuang G., Xia J., Sun W. [et al.]. Asynchronous admissibility and fault detection for delayed implicit Markovian switching systems under hidden Markovian model mechanism // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2021. Vol. 31. P. 7261–7279.
4. Zhen B., Weber K., Mejia-Ramos J. P. Mathematics Majors' Perceptions of the Admissibility of Graphical Inferences in Proofs // International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education. 2016. Vol. 2. P. 1–29.
5. Berger J. O., Strawderman W. E. Choice of Hierarchical Priors: Admissibility in Estimation of Normal Means // The Annals of Statistics. 1996. Vol. 24. P. 931–951.
6. Jiao T., Zong G., Pang G., [et al.] Admissibility analysis of stochastic singular systems with Poisson switching // Applied Mathematics and Computation. 2020. Vol. 386. P. 1–14.

7. Biagini S., Černý A. Admissible Strategies in Semimartingale Portfolio Selection // *SIAM Journal on Control and Optimization*. 2011. Vol. 49. P. 42–72.
8. Benamar M. N., Ghezzar M. A., Bouagada D., Benyettou K. On the admissibility and robust stabilization of 2D singular continuous–discrete linear systems // *International Journal of Dynamics and Control*. 2024. Vol. 12. P. 1728–1742.
9. Leeb H., Kabaila P. Admissibility of the Usual Confidence Set for the Mean of a Univariate or Bivariate Normal Population: The Unknown Variance Case // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology*. 2017. Vol. 79. P. 801–813.
10. Носков С. И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск : Облформпечать, 1996. 320 с.
11. Носков С. И. Реализация конкурса регрессионных моделей с применением критерия согласованности поведения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2021. № 2. С. 153–160.
12. Пякилла Б. И., Жмудь В. А. Корректная идентификация объекта с запаздыванием для управления им // *Автоматика и программная инженерия*. 2015. № 3 (13). С. 51–57.
13. Сметанин Ю. Г., Ульянов М. В. Алгебраическая структура с частичными операциями и модель вычислений для арифметики ограниченных целых неотрицательных чисел // *Вычислительные технологии*. 2013. Т. 18, № 4. С. 48–63.
14. Каганович Б. М., Стенников В. А. Развитие положений и моделей классической равновесной термодинамики и их приложения в энергетических исследованиях // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2018. № 6. С. 76–87.
15. Рыбаков В. В. Динамические временные операции в мультиагентных логиках // *Алгебра и логика*. 2022. Т. 61, № 5. С. 600–618.
16. Ефремов А. А. Обобщенный проекционный оператор решения задач стабилизации программных движений // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 7. С. 230–235.
17. Носков С. И., Лоншаков Р. В. Идентификация параметров кусочно-линейной регрессии // *Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем*. 2008. № 6. С. 63–64.
18. Носков С. И., Хоняков А. А. Кусочно-линейные регрессионные модели объемов перевозки пассажиров железнодорожным транспортом // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2021. № 4 (40). С. 80–89.
19. Носков С. И., Жукова М. С., Кириллова Т. К. [и др.]. Уточнение способов идентификации параметров некоторых кусочно-линейных регрессий // *Научные труды КубГТУ*. 2023. № 2. С. 75–81.
20. Носков С. И., Шахуров А. Н. Максимизация числа допустимых ошибок аппроксимации при построении линейной регрессионной модели // *Вестник Югорского государственного университета*. 2024. Т. 20, № 3. С. 57–62.
21. Российский статистический ежегодник. 2010 : стат. сб. М. : Росстат, 2010. 813 с.
22. Российский статистический ежегодник. 2016 : стат. сб. М. : Росстат, 2016. 725 с.
23. Российский статистический ежегодник. 2018 : стат. сб. М. : Росстат, 2018. 694 с.
24. Российский статистический ежегодник. 2022 : стат. сб. М. : Росстат, 2022. 691 с.
25. Российский статистический ежегодник. 2023 : стат. сб. М. : Росстат, 2023. 701 с.

References

1. Xu R.-Y., Zhang P., Dai S.-Q., Wong S.C. Admissibility of a Wide Cluster Solution in "Anisotropic" Higher-Order Traffic Flow Models. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 2007;68:562–573.

2. Yi'git A., Tun C. On the stability and admissibility of a singular differential system with constant delay. *International Journal of Mathematics and Computer Science*. 2020;15:641–660.
3. Zhuang G., Xia J., Sun W. et al. Asynchronous admissibility and fault detection for delayed implicit Markovian switching systems under hidden Markovian model mechanism. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2021;31:7261–7279.
4. Zhen B., Weber K., Mejia-Ramos J.P. Mathematics Majors' Perceptions of the Admissibility of Graphical Inferences in Proofs. *International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education*. 2016;2:1–29.
5. Berger J.O., Strawderman W.E. Choice of Hierarchical Priors: Admissibility in Estimation of Normal Means. *The Annals of Statistics*. 1996;24:931–951.
6. Jiao T., Zong G., Pang G. et al. Admissibility analysis of stochastic singular systems with Poisson switching. *Applied Mathematics and Computation*. 2020;386:1–14.
7. Biagini S., Černý A. Admissible Strategies in Semimartingale Portfolio Selection. *SIAM Journal on Control and Optimization*. 2011;49:42–72.
8. Benamar M.N., Ghezzer M.A., Bouagada D., Benyettou K. On the admissibility and robust stabilization of 2D singular continuous–discrete linear systems. *International Journal of Dynamics and Control*. 2024;12:1728–1742.
9. Leeb H., Kabaila P. Admissibility of the Usual Confidence Set for the Mean of a Univariate or Bivariate Normal Population: The Unknown Variance Case. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology*. 2017;79:801–813.
10. Noskov S.I. *Tekhnologiya modelirovaniya ob"ektov s nestabil'nym funktsionirovaniem i neopredelennost'yu v dannyykh = Technology for modeling objects with unstable functioning and uncertainty in data*. Irkutsk: Oblinformpechat', 1996:320. (In Russ.)
11. Noskov S.I. Implementation of a competition of regression models using the criterion of consistency of behavior. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology*. 2021;(2):153–160. (In Russ.)
12. Pyakillya B.I., Zhmud' V.A. Correct identification of an object with a delay for its management. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya = Automation and software engineering*. 2015;(3):51–57. (In Russ.)
13. Smetanin Yu.G., Ul'yanov M.V. An algebraic structure with partial operations and a computational model for arithmetic of bounded non-negative integers. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computing technologies*. 2013;18(4):48–63. (In Russ.)
14. Kaganovich B.M., Stennikov V.A. Development of the principles and models of classical equilibrium thermodynamics and their applications in energy research. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy industry*. 2018;(6):76–87. (In Russ.)
15. Rybakov V.V. Dynamic time operations in multi-agent logics. *Algebra i logika = Algebra and Logic*. 2022;61(5):600–618. (In Russ.)
16. Efremov A.A. Generalized projection operator for solving problems of program motion stabilization. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2024;(7):230–235. (In Russ.)
17. Noskov S.I., Lonshakov R.V. Identification of piecewise linear regression parameters. *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem = Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems*. 2008;(6):63–64. (In Russ.)
18. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Piecewise linear regression models of passenger transportation volumes by long-distance transport. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2021;(4):80–89. (In Russ.)

19. Noskov S.I., Zhukova M.S., Kirillova T.K. et al. Refinement of methods for identifying parameters of some piecewise linear regressions. *Nauchnye trudy KubGTU = Scientific works of KubSTU*. 2023;(2):75–81. (In Russ.)
20. Noskov S.I., Shakhurov A.N. Maximizing the number of acceptable approximation errors when building a linear regression model. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Ugra State University*. 2024;20(3):57–62. (In Russ.)
21. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2010: stat. sb. = Russian Statistical Yearbook. 2010 : stat. collecting*. Moscow: Rosstat, 2010:813. (In Russ.)
22. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2016: stat. sb. = Russian Statistical Yearbook. 2016 : stat. collecting*. Moscow: Rosstat, 2016:725. (In Russ.)
23. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2018: stat. sb. = Russian Statistical Yearbook. 2018 : stat. collecting*. Moscow: Rosstat, 2018:694. (In Russ.)
24. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2022: stat. sb. = Russian Statistical Yearbook. 2022 : stat. collecting*. Moscow: Rosstat, 2022:691. (In Russ.)
25. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2023: stat. sb. = Russian Statistical Yearbook. 2023 : stat. collecting*. Moscow: Rosstat, 2023:701. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Иванович Носков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационных
систем и защиты информации,
Иркутский государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Иркутск,
ул. Чернышевского, 15)
E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru

Sergei I. Noskov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information systems and
information security,
Irkutsk State Transport University
(15 Chernyshevskogo street, Irkutsk, Russia)

Сергей Вячеславович Беляев

магистрант кафедры информационных
систем и защиты информации,
Иркутский государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Иркутск,
ул. Чернышевского, 15)
E-mail: bsv2001@list.ru

Sergey V. Belyaev

Master degree student of the
sub-department of information
systems and information security,
Irkutsk State Transport University
(15 Chernyshevskogo street, Irkutsk, Russia)

Юрий Александрович Бычков

аспирант кафедры информационных
систем и защиты информации,
Иркутский государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Иркутск,
ул. Чернышевского, 15)
E-mail: nik24-11@mail.ru

Yuriy A. Bychkov

Postgraduate student of the sub-department
of information systems and
information security,
Irkutsk State Transport University
(15 Chernyshevskogo street, Irkutsk, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 05.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 14.01.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

СИСТЕМА АНАЛИЗА ТЕКСТУРЫ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е. В. Поляков¹, В. В. Дмитриева²

^{1, 2} Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», Москва, Россия
¹ EVPolyakov@mephi.ru, ² VVdmitriyeva@mephi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях современного здравоохранения возрастает потребность в эффективных методах анализа биомедицинских изображений для диагностики заболеваний. Настоящее исследование направлено на разработку системы анализа текстуры биомедицинских изображений, которая использует различные подходы для выявления структурных различий между объектами. *Материалы и методы.* В работе применяются методы анализа локальных распределений пикселей, Фурье-преобразования и фракталов. Для оценки информативности текстурных признаков используются классификатор «случайный лес» и методы уменьшения размерности и кластеризации, реализованные в библиотеке Scikit-learn. Экспериментальные данные включают изображения клеток костного мозга, КТ-снимки и новообразования кожи. *Результаты.* Результаты экспериментов показывают, что для классификации изображений клеток крови костного мозга наиболее информативными являются признаки на основе матрицы пространственной смежности и Фурье-преобразования. Для КТ-изображений новообразований кожи также выявлены эффективные текстурные признаки, достигающие f1 метрики до 0,93. *Выводы.* Разработанная система позволяет эффективно анализировать текстуру биомедицинских изображений и предоставляет инструменты для автоматизированной оценки характеристик опухолей, что может значительно повысить точность диагностики. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение функционала системы и улучшение методов визуализации данных.

Ключевые слова: машинное обучение, биомедицинские изображения, текстурные признаки, анализ характеристики изображений, методы снижения размерности

Для цитирования: Поляков Е. В., Дмитриева В. В. Система анализа текстуры биомедицинских изображений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 85–94. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-7

BIOMEDICAL IMAGE TEXTURE ANALYSIS SYSTEM

E.V. Polyakov¹, V.V. Dmitriyeva²

^{1, 2} National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia
¹ EVPolyakov@mephi.ru, ² VVdmitriyeva@mephi.ru

Abstract. *Background.* In today's healthcare environment, there is an increasing need for efficient methods to analyze biomedical images for disease diagnosis. The present study aims to develop a biomedical image texture analysis system that uses various approaches to detect

structural differences between objects. *Materials and methods.* In this work, local pixel distributions, Fourier transform, and fractal analysis methods are applied. A random forest classifier and dimensionality reduction and clustering methods implemented in the Scikit-learn library are used to evaluate the informativeness of texture features. Experimental data include bone marrow cell images, CT scans, and skin neoplasms. *Results.* Experimental results show that features based on spatial adjacency matrix and Fourier transform are the most informative for classifying blood and bone marrow cell images. For CT images and skin neoplasms, effective texture features are also identified, achieving f1 metrics as high as 0.93. *Conclusions.* The developed system enables efficient texture analysis of biomedical images and provides tools for automated evaluation of tumor features, which can significantly improve diagnostic accuracy. Further research will focus on extending the functionality of the system and improving data visualization methods.

Keywords: machine learning, biomedical images, texture features, image feature analysis, dimensionality reduction methods

For citation: Polyakov E.V., Dmitrieva V.V. Biomedical image texture analysis system. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):85–94. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-7

Введение

Использование современных высокотехнологичных методов визуализации при анализе интересующих объектов позволяет эффективно решать задачи распознавания и классификации многих структур на изображениях для промышленности и медицины. В частности, возникает необходимость выбора интересующей области или разделение изображения на определенные типы на основе структурных различий объектов или их фрагментов. Актуальной сферой применения современных технологий является обработка биомедицинских изображений [1–2].

Проблемой анализа, обнаружения и классификации медицинских изображений является обучение модели [3]. Для решения данной задачи требуется идеальная методика обучения с оптимальным балансом способностей к обобщению и вычислительно эффективной эвристической модели. Чтобы обучить модель со способностями к обобщению, необходима парадигма обучения, которая использует истинные метки и предоставляет эффективные инструменты для работы с доступными наборами данных и эффективными алгоритмами обучения.

Существует множество подходов, позволяющих выполнять сегментацию и классификацию: классические методы, основанные на гистограммах изображений и фильтрах, текстурный анализ и нейронные сети (в том числе использующие сверточные слои или трансформер) [4–5].

Для эффективного анализа медицинских изображений необходимо провести предварительный отбор характеристик, подходящих для каждой конкретной задачи и объекта. В настоящее время представлено множество инструментов, таких как MATLAB, OpenCV, Amazon Rekognition, Microsoft Azure Computer Vision, Google Colab, ij.imjoy.io, R, DeepAI, NVIDIA Clara и IBM Watson Visual Recognition, которые могут быть использованы для извлечения характеристик. Однако многие из этих решений являются коммерческими или узкоспециализированными, некоторые из них не предоставляют прямых инструментов для расчета текстурных признаков или требуют реализации

сложных алгоритмов, что затрудняет их применение в исследованиях различных биомедицинских изображений.

В связи с этим возникает необходимость в инструменте, который объединял бы основные возможности расчета характеристик с возможностью работы с пользовательскими изображениями в удобном формате, позволяя проводить сравнение и анализ. В качестве анализируемой характеристики объектов рассматривается их текстура, а также используются методы текстурного анализа.

Цель исследования – разработка системы анализа текстуры биомедицинских изображений.

Материалы и методы

Формирование подхода к анализу текстуры объекта интереса на основе тона и текстуры – один из фундаментальных признаков человеческой интерпретации и идентификации объектов или областей, представляющих интерес на цветном изображении. Текстура и тон имеют неразрывную связь друг с другом.

На данный момент существует множество способов описать текстуру изображения. Один из подходов – статистический – основывается на распределении пикселей во всем изображении или в некоторой окрестности заданной точки. Простейший вариант – анализ гистограммы изображения и подсчет некоторых статистических характеристик по ней, но в этом подходе анализируется все изображение в целом, не учитываются локальные распределения пикселей. Другой способ – анализ определенных примитивов на изображении. Например, это могут быть пары пикселей, серии или зоны с одинаковой яркостью.

Принципиально другая группа подходов анализа текстуры – методы, основанные на преобразованиях. При данном подходе изображение представляется в пространстве, система координат которого имеет интерпретацию, тесно связанную с характеристиками текстуры (такими как частота или масштаб) [6]. Наиболее часто применяемые преобразования – Фурье-преобразование, вейвлет-преобразование, признаки Тамуга и преобразование Габора. В случае с преобразованием Фурье анализируются частоты, в случае вейвлет-преобразования – частоты с учетом их локализации и масштаба [6–9].

Еще один подход – текстурные характеристики, вычисление которых основывается на использовании моделей. Примерами таких методов являются использование авторегрессионной или фрактальной модели [6]. В литературе рассмотрено множество способов для расчета фрактальной размерности [10–15]. Преимуществом использования фрактальных текстурных признаков является интерпретируемость, так как фрактальная размерность отражает сложность контура и его самоподобие на разных масштабах. К недостаткам можно отнести сложный процесс подбора, настройки параметров и выбор из большого количества различных подходов к расчету.

Ввиду разнообразия подходов к анализу текстуры в работе показаны три подхода с наименьшими сложностями в подборе параметров, которые рассматривают текстуру с принципиально разных сторон:

- анализ локальных распределений пикселей: признаки, основанные на матрице пространственной смежности и длинах серий;
- анализ как локальных, так и более глобальных структур с точки зрения их частотных составляющих: текстурные признаки на основе Фурье-преобразования;

– анализ самоподобия и сложности контуров деталей текстуры: текстурные признаки на основе фракталов для псевдотрехмерного изображения и контуров, полученных с помощью адаптивной бинаризации.

При анализе текстур можно заметить, что в каждом случае в основе метода лежит простая идея, основанная на определенных особенностях текстуры, что позволяет подобрать набор подходов, который будет наилучшим образом отражать особенности текстуры изображений заданного биомедицинского объекта. Таким образом, можно получить множество интерпретируемых текстурных признаков для каждой группы классов классифицируемых текстур. Но для выявления наиболее эффективных подходов необходимо проанализировать значимость каждой группы признаков.

Рассмотрим подходы к анализу значимости признаков [16]. Первая группа основана на распределении признаков: расчет дисперсии и корреляции. Вторая группа – оценка значимости признаков, встроенная в некоторые модели машинного обучения: логистическая регрессия, решающие деревья и ансамбли деревьев. Третья группа – методы, не зависящие от глобальной модели (global model agnostic methods), которые отражают общее поведение модели. К этой группе относятся, например, partial dependence plot и permutation feature importance. Четвертая группа – методы, не зависящие от локальной модели (local model agnostic methods), позволяющие объяснять поведение модели на конкретных данных. Например, один из таких методов – local surrogate models (LIME), Shapley values, SHAP [16].

В работе представлен наиболее простой подход, который сочетается с применением классификатора «случайный лес» (Random Forest), – оценка информативности, встроенная в данный метод и использующая значения показателя неоднородности (Gini Impurity). Применены методы уменьшения размерности и кластеризации. В первую очередь выбор метода кластеризации и уменьшения размерности был обусловлен простотой его использования в создаваемой системе: число параметров, время вычисления, наличие библиотек Python (рассматривались библиотеки Scikit-learn).

Распространенными методами кластеризации, реализованными в Scikit-learn, являются k-means, spectral clustering и DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [17]. Для уменьшения размерности данных рассматривались два подхода: метод главных компонент (PCA) и стохастическое вложение соседей с распределением Стьюдента (t-SNE) [18–19].

Применение текстурного анализа для выявления текстурных особенностей на изображениях КТ, МРТ и ПЭТ для ранней диагностики новообразований [20–26], получившая название радиомика, предлагает ряд стратегий и подходов для преобразования медицинских изображений в количественные, интерпретируемые и поддающиеся анализу многомерные данные [21].

Текстурный анализ позволяет добиться улучшения диагностики новообразований и предоставляет некоторые дополнительные возможности [21]:

- предоставление дополнительной информации о внутренней структуре опухоли и описание некоторых ее характеристик, например структуры внутри опухоли, сосудистые паттерны и градиенты плотности;
- предоставление численной и автоматизированной оценки характеристик опухоли, что может помочь устранить субъективность и повысить эффективность диагностики;

- извлечение невидимой человеческому глазу информации;
- отслеживание изменений опухоли в динамике (так как с численными характеристиками проще работать).

При тестировании в работе использованы изображения клеток костного мозга на различных стадиях гемопоэза, а также данные из открытых источников для анализа текстуры КТ-снимков из злокачественного новообразования кожи.

Результаты и обсуждение

Разработана система анализа биомедицинских изображений. Расчет текстурных характеристик реализуется модулем на языке Python с функциями на языке C++. Это обосновывается тем, что в ряде случаев реализация с использованием языка Python неэффективна по времени, даже несмотря на использование `numpy` массивов и `list comprehension`. В связи с этим высоконагруженные и длительные вычисления вынесены отдельно в динамическую библиотеку `dll`, написанную на языке C++, и организованное взаимодействие между ней и модулем на Python с помощью `ctypes`. Таким образом, гибкость Python и быстродействие C++ совмещены для достижения удобной и эффективной работы модуля.

Отдельно следует отметить использование библиотеки `OpenCV` в ходе реализации некоторых подходов к анализу текстуры. Функционал библиотеки позволяет использовать ее для эффективного и быстрого выделения и анализа контуров, загрузки изображений, применения алгоритмов бинаризации, а также получения Фурье-преобразования.

Система с модулем анализа текстуры реализована в виде интернет-приложения на базе трех технологий: `Flask` – веб-сервер, `React` – веб-интерфейс и `Plotly.js` – создание графиков. При разработке интерфейса с визуализацией и анализом полученных данных применялись следующие библиотеки:

- `Glob` – для работы с путями нахождения необходимых объектов;
- `OpenCV` – для загрузки изображений;
- `Matplotlib` с модулем `Pyplot` и `Seaborn` – для визуализации полученных данных при проведении эксперимента;
- `Pandas` и `Scikit-learn` – для анализа данных с использованием методов машинного обучения;
- `Plotly` – для интерактивной визуализации данных.

Для эффективной работы врача-исследователя с системой анализа текстур предоставлена возможность загрузки изображений, расчета текстурных признаков, визуализации и анализа полученных данных (рис. 1).

Предложены текстурные характеристики для анализа биомедицинских изображений, рассматривающие понятие текстуры с разных сторон и имеющие сравнительно небольшое число параметров для настройки. К ним относятся характеристики на основе матрицы пространственной смежности, матрицы длин серий, фракталов и Фурье-преобразования. С применением разработанной системы проведен анализ закономерностей между текстурными признаками и визуальным восприятием текстуры и структурными различиями биомедицинских объектов.

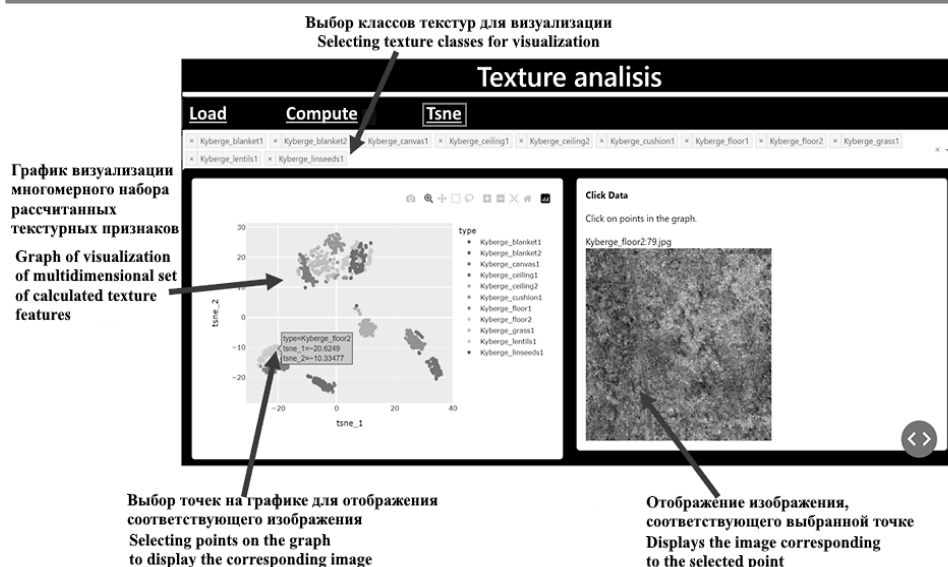


Рис. 1. Визуализация данных в интернет-приложении

Проведено сравнение эффективности текстурных признаков для классификации различных изображений биомедицинских объектов:

- для изображений клеток крови костного мозга информативными являются признаки, основанные на матрице пространственной смежности и Фурье-преобразования;
- для фрагментов КТ-изображений в норме и патологии информативными являются признаки на основе матрицы пространственной смежности;
- для паттерна пигментной сети на новообразовании кожи информативны признаки на основе Фурье-преобразования и фракталов, для паттернов негативная сеть и точки/глобулы – признаки на основе матрицы пространственной смежности и фракталов.

Заключение

Исследование посвящено разработке системы анализа текстуры и проверке ее эффективности для выявления структурных различий биомедицинских изображений. Реализовано решение на основе интернет-технологий для анализа текстуры и визуализации полученных данных. Проведены эксперименты по анализу корректности работы модуля и эффективности текстурных характеристик для классификации изображений медико-биологических объектов. В ходе исследования выделены структурные различия на КТ-изображениях нормальной ткани и с наличием новообразований. Характеристики рассчитывались для фрагментов изображений, $f1$ метрика составила для классификатора «случайный лес» (Random Forest) – $0,79 \pm 0,04$. Проведен поиск паттернов на изображениях новообразований кожи. Для найденных паттернов (пигментная сеть, негативная сеть, точки/глобулы) на изображениях новообразований кожи вычислена $f1$ метрика, классификатор «случайный лес» (Random Forest) – $0,93 \pm 0,01$. Выполнен анализ структурных различий изображений ядер, содержащих клетки костного мозга на разных стадиях гемопоэза. Рассчитана $f1$

метрика для классификаторов «случайный лес» (Random Forest) – $0,64 \pm 0,01$ и метода опорных векторов (Support Vector Machines) – $0,71 \pm 0,01$.

Дальнейшая работа предполагает дополнение модуля к анализу текстур на основе вейвлетов и локальных двоичных шаблонов, а также расширение способов визуализации и интерпретации распределений данных в рассматриваемую систему.

Список литературы

1. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis // *Cancers*. 2023. T. 15, № 14. P. 3608.
2. Fanous M. J., Pillar N., Ozcan A. Digital staining facilitates biomedical microscopy // *Frontiers in Bioinformatics*. 2023. T. 3. P. 1243663.
3. Tavakoli S., Ghaffari A., Kouzehkhanan Z. M., Hosseini R. New segmentation and feature extraction algorithm for classification of white blood cells in peripheral smear images // *Scientific Reports*. 2021. T. 11, № 1. P. 19428.
4. Ryu D., Kim J., Lim D. J. [et al.]. Label-free white blood cell classification using refractive index tomography and deep learning // *BME frontiers*. 2021.
5. Mollazade K. [et al.]. Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging // *Computers and electronics in agriculture*. 2013. T. 98. P. 34–45.
6. Tang X., Stewart W. K. Optical and sonar image classification: wavelet packet transform vs Fourier transform // *Computer vision and image understanding*. 2000. T. 79, № 1. P. 25–46.
7. Abdesselam A. Texture image retrieval using Fourier transform // *Proc. Int. Conf. Commun., Comput. Power (ICCCP'09)*. 2009.
8. Gibson D., Gaydecki P. A. Definition and application of a fourier domain texture measure: applications to histological image segmentation // *Computers in biology and medicine*. 1995. T. 25, № 6. P. 551–557.
9. Dincic M., Popovic T. B., Kojadinovic M. [et al.]. Morphological, fractal, and textural features for the blood cell classification: The case of acute myeloid leukemia // *European Biophysics Journal*. 2021. T. 50. P. 1111–1127. doi: 10.1007/s00249-021-01574-w
10. Zhuang X., Meng Q. Local fuzzy fractal dimension and its application in medical image processing // *Artificial Intelligence in Medicine*. 2004. T. 32, № 1. P. 29–36.
11. Metze K., Adam R., Florindo J. B. The fractal dimension of chromatin-a potential molecular marker for carcinogenesis, tumor progression and prognosis // *Expert review of molecular diagnostics*. 2019. T. 19, № 4. P. 299–312.
12. Costa A. F., Humpire-Mamani G., Traina A. J. M. An efficient algorithm for fractal analysis of textures // *25th SIBGRAPI conference on graphics, patterns and images*. 2012. P. 39–46.
13. Costa A. F., Tekli J., Traina A. J. M. Fast fractal stack: fractal analysis of computed tomography scans of the lung // *Proceedings of the 2011 international ACM workshop on Medical multimedia analysis and retrieval*. 2011. P. 13–18.
14. A multiresolution clinical decision support system based on fractal model design for classification of histological brain tumours // *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2015. T. 41. P. 67–79.
15. Molnar C. Interpretable machine learning // *Lulu. Com*. 2020.
16. Pedregosa [et. al.]. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *JMLR* 12. 2011. P. 2825–2830.
17. Rudin C. [et al.]. Interpretable machine learning: Fundamental principles and 10 grand challenges // *Statistic Surveys*. 2022. T. 16. P. 1–85.
18. Van der Maaten L., Hinton G. Visualising Data using t-SNE // *J. of machine learning research*. 2008. Vol. 9, № 11.

19. Mayerhoefer M. E. [et al.]. Introduction to radiomics // J. of Nuclear Medicine. 2020. Vol. 61, № 4. P. 488–495.
20. Ursprung S. [et al.]. Radiomics of computed tomography and magnetic resonance imaging in renal cell carcinoma—a systematic review and meta-analysis // European radiology. 2020. Т. 30. P. 3558–3566.
21. Гордуладзе Д. Н., Сирота Е. С., Рапопорт Л. М. [и др.]. Возможности текстурного анализа лучевых методов визуализации в диагностике образований паренхимы почки // Онкоурология. 2021. № 4. С. 129–135.
22. Gorduladze D., Sirota E., Rapoport L. [et al.] Prospects of texture analysis in radiological imaging for diagnosis of renal parenchyma tumor // Cancer Urology. 2021. № 17. P. 129–135. doi: 10.17650/1726-9776-2021-17-4-129-135
23. Manaev A. V., Trukhin A. A., Zakharova S. M. [et al.]. Textural Statistical Features of Ultrasound Imaging of Thyroid Nodules in the Assessment of Malignancy Status // Physics of Atomic Nuclei. 2023. Т. 86, № 11. P. 2500–2506.
24. Дмитриева В. В., Тупицын Н. Н., Поляков Е. В [и др.]. Медицинская информационная система с применением web-технологий для диагностики острых лимфобластных лейкозов и минимальной остаточной болезни // Безопасность информационных технологий. 2021. Т. 28, № 3. С. 44–45. doi: 10.26583/bit.2021.3.03
25. Selchuk V. Y., Rodionova O. V., Sukhova O. G. [et al.]. Methods of formation of the knowledge base in the diagnosis of melanoma // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Т. 798, № 1. P. 012137.
26. Fazeli S., Samiei A., Lee T. D., Sarrafzadeh M. Beyond Labels: Visual Representations for Bone Marrow Cell Morphology Recognition // Computer Vision and Pattern Recognition. 19.05.2022. doi: 10.48550/arXiv.2205.09880

References

1. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis. *Cancers*. 2023;15(14):3608.
2. Fanous M.J., Pillar N., Ozcan A. Digital staining facilitates biomedical microscopy. *Frontiers in Bioinformatics*. 2023;3:1243663.
3. Tavakoli S., Ghaffari A., Kouzehkhanan Z.M., Hosseini R. New segmentation and feature extraction algorithm for classification of white blood cells in peripheral smear images. *Scientific Reports*. 2021;11(1):19428.
4. Ryu D., Kim J., Lim D. J. et al. Label-free white blood cell classification using refractive index tomography and deep learning. *BME frontiers*. 2021.
5. Mollazade K. et al. Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging. *Computers and electronics in agriculture*. 2013;98:34–45.
6. Tang X., Stewart W.K. Optical and sonar image classification: wavelet packet transform vs Fourier transform. *Computer vision and image understanding*. 2000;79(1):25–46.
7. Abdesselam A. Texture image retrieval using Fourier transform. *Proc. Int. Conf. Commun., Comput. Power (ICCCP'09)*. 2009.
8. Gibson D., Gaydecki P.A. Definition and application of a fourier domain texture measure: applications to histological image segmentation. *Computers in biology and medicine*. 1995;25(6):551–557.
9. Dincic M., Popovic T.B., Kojadinovic M. et al. Morphological, fractal, and textural features for the blood cell classification: The case of acute myeloid leukemia. *European Biophysics Journal*. 2021;50:1111–1127. doi: 10.1007/s00249-021-01574-w
10. Zhuang X., Meng Q. Local fuzzy fractal dimension and its application in medical image processing. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2004;32(1):29–36.
11. Metze K., Adam R., Florindo J.B. The fractal dimension of chromatin—a potential molecular marker for carcinogenesis, tumor progression and prognosis. *Expert review of molecular diagnostics*. 2019;19(4):299–312.

12. Costa A.F., Humpire-Mamani G., Traina A.J.M. An efficient algorithm for fractal analysis of textures. *25th SIBGRAPI conference on graphics, patterns and images*. 2012:39–46.
13. Costa A.F., Tekli J., Traina A.J.M. Fast fractal stack: fractal analysis of computed tomography scans of the lung. *Proceedings of the 2011 international ACM work-shop on Medical multimedia analysis and retrieval*. 2011:13–18.
14. A multiresolution clinical decision support system based on fractal model design for classification of histological brain tumours. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2015;41:67–79.
15. Molnar C. Interpretable machine learning. *Lulu. Com*. 2020.
16. Pedregosa et. al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *JMLR 12*. 2011:2825–2830.
17. Rudin C. et al. Interpretable machine learning: Fundamental principles and 10 grand challenges. *Statistic Surveys*. 2022;16:1–85.
18. Van der Maaten L., Hinton G. Visualising Data using t-SNE. *J. of machine learning research*. 2008;9(11).
19. Mayerhoefer M.E. et al. Introduction to radiomics. *J. of Nuclear Medicine*. 2020;61(4):488–495.
20. Ursprung S. et al. Radiomics of computed tomography and magnetic resonance imaging in renal cell carcinoma—a systematic review and meta-analysis. *European radiology*. 2020;30:3558–3566.
21. Gorduladze D.N., Sirota E.S., Rapoport L.M. [et al.]. Possibilities of textural analysis of radiation imaging methods in the diagnosis of kidney parenchyma formations. *Onkourologiya = Oncourology*. 2021;(4):129–135. (In Russ.)
22. Gorduladze D., Sirota E., Rapoport L. [et al.]. Prospects of texture analysis in radiological imaging for diagnosis of renal parenchyma tumor. *Cancer Urology*. 2021;(17):129–135. doi: 10.17650/1726-9776-2021-17-4-129-135
23. Manaev A.V., Trukhin A.A., Zakharova S.M. et al. Textural Statistical Features of Ultrasound Imaging of Thyroid Nodules in the Assessment of Malignancy Status. *Physics of Atomic Nuclei*. 2023;86(11):2500–2506.
24. Dmitrieva V.V., Tupitsyn N.N., Polyakov E.V [et al.]. A web-based medical information system for the diagnosis of acute lymphoblastic leukemia and minimal residual disease. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy = Information technology security*. 2021;28(3):44–45. (In Russ.). doi: 10.26583/bit.2021.3.03
25. Selchuk V.Y., Rodionova O.V., Sukhova O.G. et al. Methods of formation of the knowledge base in the diagnosis of melanoma. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;798(1):012137.
26. Fazeli S., Samiei A., Lee T.D., Sarrafzadeh M. Beyond Labels: Visual Representations for Bone Marrow Cell Morphology Recognition. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 19.05.2022. doi: 10.48550/arXiv.2205.09880

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Валерьевич Поляков

кандидат технических наук, доцент
кафедры медицинской физики,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»
(Россия, Москва, Каширское шоссе, 31)
E-mail: EVPolyakov@mephi.ru

Evgeny V. Polyakov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-
department of medical physics,
National Research Nuclear University
MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute)
(31 Kashirskoe shosse, Moscow, Russia)

Валентина Викторовна Дмитриева

кандидат технических наук, доцент
кафедры электрофизических установок,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»
(Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31)
E-mail: VVdmitriyeva@mephi.ru

Valentina V. Dmitrieva

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of electrophysical systems,
National Research Nuclear
University MEPHI (Moscow
Engineering Physics Institute)
(31 Kashirskoe shosse, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.01.2025

Поступила после рецензирования/Revised 19.02.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ДИФРАКЦИИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

О. В. Кондырев¹, А. О. Лапич², М. Ю. Медведик³

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

¹ kow20002204@mail.ru, ² lapich.a@yandex.ru, ³ _medv@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Основная задача исследования заключается в эффективном решении сложной в вычислительном отношении обратной задачи дифракции, применимой к объектам произвольной геометрии. Для достижения этой цели используются параллельные алгоритмы. Особое внимание уделяется минимизации времени вычислений. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи необходимо численно решить интегральное уравнение. Для эффективного решения обратной задачи используется двухшаговый метод. *Результаты.* Представлены графические изображения, иллюстрирующие исходные и восстановленные значения для неоднородных объектов, а также даны оценки ускорения и эффективности программы. *Выводы.* Разработан и реализован численный метод, позволяющий решать задачу определения неоднородностей в объектах. Для ускорения вычислительного процесса применен программный интерфейс MPI. Сравнение полученных результатов восстановления объекта демонстрирует возможность выявления различных типов неоднородностей.

Ключевые слова: обратная задача, интегральное уравнение, краевая задача, численный метод, двухшаговый метод, расчетные сетки, параллельные вычисления, MPI

Для цитирования: Кондырев О. В., Лапич А. О., Медведик М. Ю. Применение параллельных вычислений в обратной задаче дифракции на диэлектрических объектах с неоднородностями // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 95–106. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-8

APPLICATION OF PARALLEL CALCULATIONS IN THE INVERSE DIFFRACTION PROBLEM ON DIELECTRIC OBJECTS WITH INHOMOGENEITIES

O.V. Kondyrev¹, A.O. Lapich², M.Yu. Medvedik³

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

¹ kow20002204@mail.ru, ² lapich.a@yandex.ru, ³ _medv@mail.ru

Abstract. *Background.* The main objective of the study is to effectively solve the computationally complex inverse diffraction problem applicable to objects of arbitrary geometry. Parallel algorithms are used to achieve this goal. Special attention is paid to minimizing the calculation time. *Materials and methods.* To solve this problem, it is necessary to numerically

solve the integral equation. A two-step method is used to effectively solve the inverse problem. *Results.* Graphical images illustrating the original and reconstructed values for inhomogeneous objects are presented. Estimates of the acceleration and effectiveness of the program are presented. *Conclusions.* A numerical method has been developed and implemented to solve the problem of determining inhomogeneities in objects. The MPI programming interface is used to speed up the computing process. A comparison of the results demonstrates the possibility of identifying different types of inhomogeneities.

Keywords: inverse problem, integral equation, boundary value problem, numerical method, two-step method, computational grids, parallel calculations, MPI

For citation: Kondyrev O.V., Lapich A.O., Medvedik M.Yu. Application of parallel calculations in the inverse diffraction problem on dielectric objects with inhomogeneities. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):95–106. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-8

Введение

В настоящее время задача эффективной и качественной медицинской помощи остается актуальной. Обратная задача дифракции – важная область исследований в оптике, физике и технике с широким спектром применения: от медицинской диагностики до радиолокационных изображений и др. [1–6]. Это задача определения формы и свойств объекта, который создает наблюдаемое дифракционное поле. В отличие от прямой задачи дифракции, где мы знаем форму и свойства объекта и хотим вычислить дифракционное поле, в обратной задаче мы знаем только дифракционное поле, которое порождает исследуемый объект, и хотим определить свойства объекта. Качество восстановленного изображения напрямую зависит от источника внешнего поля и размера расчетной сетки, за счет которой решается задача. Для получения качественного изображения неоднородностей требуется увеличение размера расчетной сетки. Однако при уменьшении размера ячейки сетки необходимо увеличивать частоту источника (что требует применения для подобных проверок специализированного дорогостоящего оборудования), иначе восстановленное изображение будет искаженным.

Решение обратной задачи дифракции часто требует огромных вычислительных ресурсов, что делает применение параллельных вычислений крайне актуальным. Преимуществами параллельных вычислений являются: ускорение, эффективность, возможность решения сложных задач.

На данный момент основными подходами являются:

- распределенные вычисления: использование множества компьютеров, объединенных в сеть, для обработки больших объемов данных;
- GPU-ускорение: использование графических процессоров для выполнения вычислительно-интенсивных задач, таких как обработка изображений и моделирование физических процессов.

В настоящей работе для организации параллельных вычислений будет применен программный интерфейс MPI (Message Passing Interface) [7–13]. Данный стандарт широко применяется при создании программ для кластеров и суперкомпьютеров, обеспечивая эффективное взаимодействие между множеством процессов.

Материалы и методы

Рассмотрим неоднородный плоский объект Q , расположенный в пространстве R^2 . Область вне тела (R^2 / Q) характеризуется волновым числом $k_0 > 0$, а внутри тела задается функцией неоднородности $k(x)$ при $x \in Q$. Таким образом, получаем следующую систему:

$$k_p(x) = \begin{cases} k(x), x \in Q, \\ k_0, x \notin Q. \end{cases} \quad (1)$$

Мы представляем общее поле как сумму падающего и отраженного от объекта, т.е.

$$u_p(x) = u_0(x) + u(x), \quad (2)$$

где $u_0(x)$ является полем падающей волны, а $u(x)$ – функция поля, отраженного от объекта Q . Поставленная задача характеризуется уравнением Гельмгольца, которое представляет собой частный случай дифференциального уравнения в частных производных второго порядка [14]:

$$\Delta u_p(x) + k_p^2(x)u_p(x) = 0. \quad (3)$$

В контексте данной задачи уравнение Гельмгольца используется для описания распространения и рассеяния волн на объектах различной геометрии. Решение этого уравнения позволяет получить информацию о геометрических и электромагнитных свойствах объекта.

На границе раздела двух сред должны выполняться условия сопряжения, которые отражают физические принципы сохранения заряда и непрерывности электрического поля. Эти условия включают

$$[u_p(x)]_{\partial Q} = 0, \left[\frac{\partial u_p(x)}{\partial n} \right]_{\partial Q} = 0, \quad (4)$$

где $[.]_{\partial Q}$ обозначает скачок поля на границе объекта Q .

На бесконечности выполняются условия излучения Зоммерфельда [15]:

$$\frac{\partial u(x)}{\partial r} - ik_0 u(x) = o\left(\frac{1}{\sqrt{r}}\right), r = |x| \rightarrow \infty, \quad (5)$$

которые представляют собой граничные условия для электромагнитного поля в безграничной области. Эти условия гарантируют, что поле излучается в бесконечность без отражений и соответствует физически реализуемым волнам.

Предположим, что внешнее электромагнитное поле, падающее на объект, создается точечным источником, расположенным вне тела. В таком случае вектор напряженности электрического поля задается формулой

$$u_0(x) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 |x - x_0|), \quad (6)$$

где x_0 – координата исходного положения, которая не принадлежит телу Q .

Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти неизвестную функцию неоднородности $k(x)$ по известным характеристикам источника и известного поля вне тела.

1. Сведение задачи к интегральному уравнению

Прямая задача дифракции может быть описана с помощью интегрального уравнения Липпмана – Швингера, которое связывает рассеянное поле с падающим полем и поляризуемостью тела [16–18]:

$$u(x) - \int_Q G(x, y) (k_0^2 - k^2(y)) u(y) dy = u_0(x), \quad (7)$$

где $G(x, y) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 |x - x_0|)$ является фундаментальным решением уравнения Гельмгольца.

Уравнение Липпмана – Швингера является интегральным уравнением Фредгольма второго рода и может быть решено численно с использованием различных методов. Чтобы решить эту проблему, мы применяем метод коллокации. Возьмем исследуемый объект Q и введем на нем единую вычислительную сетку размера $N \times N$, т.е. $Q = \{x: a < x_1 < b, c < x_2 < d, x_3 = c\}$. Размер ячейки равен $h_{x_1} = (b - a) / N$, $h_{x_2} = (d - c) / N$. Пронумеруем все полученные прямоугольники расчетной сетки $\Pi_{kl} \in Q$, где $1 < k < N$, $1 < l < N$.

Теперь нам нужно изменить существующую вычислительную сетку. Для этого каждую ячейку Π_{kl} необходимо продублировать четыре раза и переместить на небольшое расстояние в разных направлениях: влево-вверх (рис. 1, а), вправо-вверх (рис. 1, б), справа вниз (рис. 1, в), слева вниз (рис. 1, г), где прямоугольник с пунктирной границей является исходной ячейкой Π_{kl} , и сплошная граница – это новая сетка.

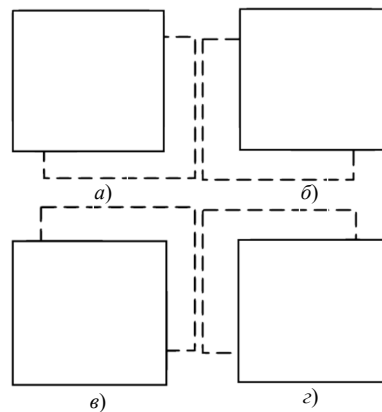


Рис. 1. Элемент вычислительной сетки

Аналогично работаем с остальными элементами. Таким образом, мы получаем новое разбиение тела Q , элементы которого обозначаются как Π_{kl} . Поскольку каждая ячейка была увеличена в 4 раза, размер задачи увеличивается как $2N \times 2N$. Обозначим это через $\tilde{N} = 2N$. Такие сдвиги приводят

к появлению чрезмерно детерминированной вычислительной сетки. Эти изменения позволяют хранить больше информации, что, в свою очередь, делает задачу более стабильной.

Предлагаемый подход основан на использовании обобщенных расчетных сеток [16–18]. Это приводит к более эффективному использованию вычислительных ресурсов и повышению устойчивости решения обратной задачи. Важно отметить, что размеры ячеек расчетной сетки остаются неизменными. Меняются положение и количество ячеек. Благодаря этому мы получаем новую математическую модель задачи, которая более устойчива к восстановлению неоднородностей.

Введем кусочно-постоянную базисную функцию $\chi_{kl}(x)$. Представим $u(x)$ в виде линейной комбинации базисных функций $u(x) = \sum_{kl} \alpha_{kl} \chi_{kl}(x)$. Заменяя неизвестную функцию в уравнении (7) линейной комбинацией, мы получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для нахождения неизвестных коэффициентов α_{kl} .

Поскольку для решения обратной задачи требуется значение суммарного поля при точечных наблюдениях, мы дополнительно опишем процедуру их построения. Требуемое количество точек равно порядку расчетной сетки, т.е. $4N^2$ или $\tilde{N}^2$.

Центр каждой ячейки будет смещен в соответствии со значением ширины или длины тела по одной координате в сторону, противоположную направлению от источника поля. В связи с тем, что ячейки были смещены за пределы тела, мы отодвигаем все точки наблюдения на небольшое расстояние. Таким образом, все значения полного поля будут взяты с противоположной стороны от источника гармонических колебаний.

2. Решение обратной задачи двухшаговым методом

Решением обратной задачи является восстановление функции, которая описывает неоднородность среды, используя данные о полном поле, измеренном в некоторых точках. Ключевым моментом является использование уравнения, которое связывает полное поле с неоднородностью. Мы восстановим неоднородности на объекте, используя двухшаговый метод. На этапе решения прямой задачи определяем значения поля $U_v(y^v)$ в точках наблюдения. После этого мы можем найти $J(y)$ как решение интегрального уравнения первого рода:

$$U_v(y^v) = \int_Q G(x, y^v) J(x) dx + f(y^v).$$

Последним шагом является вычисление требуемой функции неоднородности $k(y)$:

$$\frac{J(y)}{k^2(y) - k_0^2} - \int_Q G(x, y) J(x) dx = f(y).$$

Более подробную информацию о применении двухшагового метода можно найти в работах [14–20].

3. Использование Message Passing Interface

Представленная задача отличается большой вычислительной сложностью. Размер матрицы напрямую влияет на время решения как прямой, так и обратной задачи. В связи с этим необходимо реализовать параллельный алгоритм.

Решение задачи можно разделить на четыре последовательных этапа:

1. На первом этапе вычисляются элементы матрицы для прямой задачи. Каждый элемент матрицы вычисляется независимо от других, что упрощает процесс распараллеливания. Это занимает примерно 10 % от общего времени, затрачиваемого на процесс решения и необходимого для имитации ближнего поля в точках наблюдения.

2. Окончательное решение прямой задачи получается путем решения системы линейных алгебраических уравнений. Мы решаем систему, основанную на матрице, полученной на предыдущем шаге, чтобы найти значения для неизвестных переменных.

3. Следующим шагом является вычисление матрицы для обратной задачи. Матрица должна быть рассчитана с максимально возможной точностью, поскольку она составлена как решение интегрального уравнения первого рода. Количество условностей этой матрицы обычно значительно превышает количество условностей матрицы, полученной на первом этапе.

4. Наконец, мы решаем другую систему линейных алгебраических уравнений, которая была вычислена на предыдущем этапе. Это помогает нам найти значения входных параметров, которые необходимы для получения выходных данных или результатов решения обратной задачи.

Основываясь на результатах первого и третьего этапов, мы хотим получить матрицу, пригодную для решения на этапах 2 и 4. Таким образом, параллельный алгоритм применим только на этапах, упомянутых выше.

Для создания параллельной программы был выбран пакет MPI. Так как MPI работает с отдельной памятью, это позволяет эффективно сохранять матрицу на различных процессах. Для взаимодействия процессов мы используем функции обмена сообщениями, такие как MPI_SEND и MPI_SSEND, а также функции коллективного обмена сообщениями MPI_BCAST и MPI_REDUCE.

Поскольку на всех этапах мы имеем достаточно большую матрицу, было бы логично распределить ее между запущенными процессами для оптимального выделения памяти. Это будет удобно как для заполнения, так и для решения СЛАУ. Мы будем хранить матрицу в виде лент для каждого запущенного процесса отдельно. Ширина ленты будет равна ширине самой матрицы $\tilde{N}$, а высота ленты $\tilde{N}_i$ для каждого процесса i рассчитывается по следующей формуле:

$$N_i = \left\lceil \frac{\tilde{N}}{s} \right\rceil + \begin{cases} 1, & i < \text{mod}(\tilde{N} / s), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где s – количество процессов, $i = 1 \dots s$. Очевидно, что $\sum_{i=1}^s \tilde{N}_i = \tilde{N}$. Последний член отвечает за коррекцию высоты в том случае, если целочисленное деление высоты матрицы на количество процессов приводит к получению остатка.

После деления мы распределяем оставшиеся строки одну за другой по процессам, начиная с первой, т.е. если $\text{mod}(\tilde{N}/s) = 0$, то все процессы получают равные участки матрицы. Поскольку матрица уже распределена между процессами, заполнение матрицы в прямой и обратной задачах происходит без обмена пакетами информации между запущенными процессами, и каждый из них заполняет свою часть. Для решения СЛАУ был выбран метод Гаусса. Благодаря специальному матричному хранилищу становится возможным выполнять параллельные операции в методе Гаусса на этапе обнуления столбца под ведущим элементом. Для этого основная строка отправляется всем процессам, и каждый из них независимо выполняет разностную операцию со своими строками.

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования мы возьмем квадратную плоскость, внутри которой расположены некоторые неоднородности. Поместим тело в центр координат и примем длину одной стороны квадрата равной 0,15 м.

При решении прямой задачи мы сразу же установим значения функции $\tilde{k}(y) \equiv (k_0^2 - k^2(y))$. Для получения численных результатов мы принимаем следующие значения неоднородности: 0,15 – фоновое значение, от 0,55 до 0,8 – значения неоднородностей. Сетку на теле возьмем порядка $N = 40$, тогда обобщенная сетка будет порядка $\tilde{N} = 80$.

Предположим, что источник излучения расположен в точке $x_0 = (0, -3)$. Это означает, что источник падающего поля находится вне тела.

Применим описанный выше алгоритм по восстановлению неоднородности в объекте. На рис. 2 изображена исходная и восстановленная схемы неоднородности. Вычислительный комплекс полностью восстановил форму и значения неоднородностей в исследуемом теле.

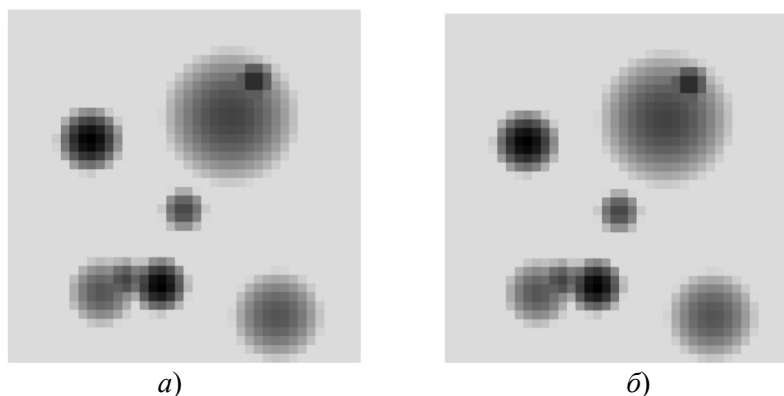


Рис. 2. Значения функции неоднородности $k(x)$:
а – исходные; б – восстановленные

Для симуляции реальных данных внесем случайный шум до 5 % в задачу и повторим вычисления. Результат отображен на рис. 3. Максимальная ошибка в значениях составила 0,035.

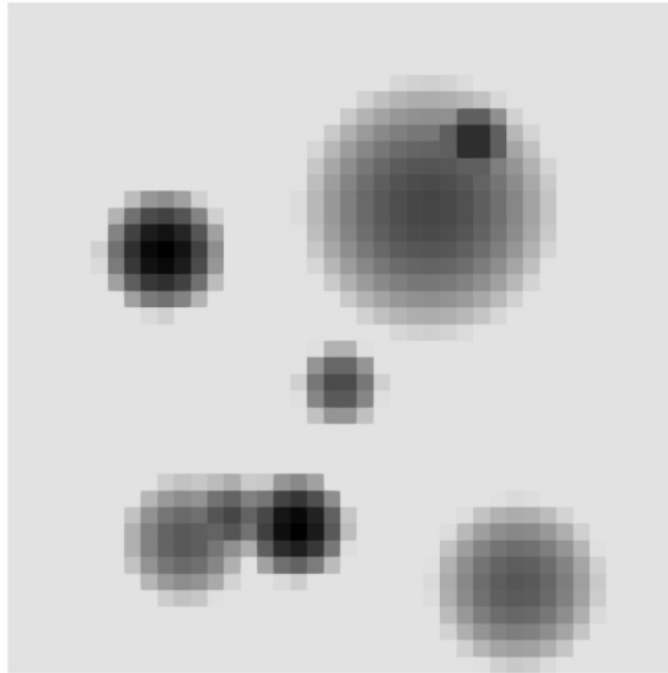


Рис. 3. Восстановленные значения функции неоднородности $k(x)$ с введением погрешности 5 %

Для оценки ускорения и эффективности программы выполним серию запусков с количеством вычислительных процессов от 1 до 10. Результаты эксперимента отображены далее на рис. 4–6 в виде графика.

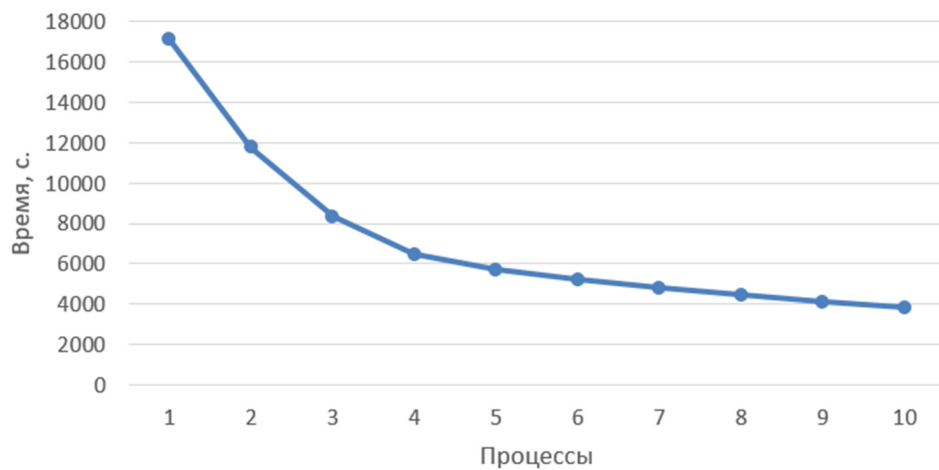


Рис. 4. Сравнение скорости при использовании параллельных вычислений

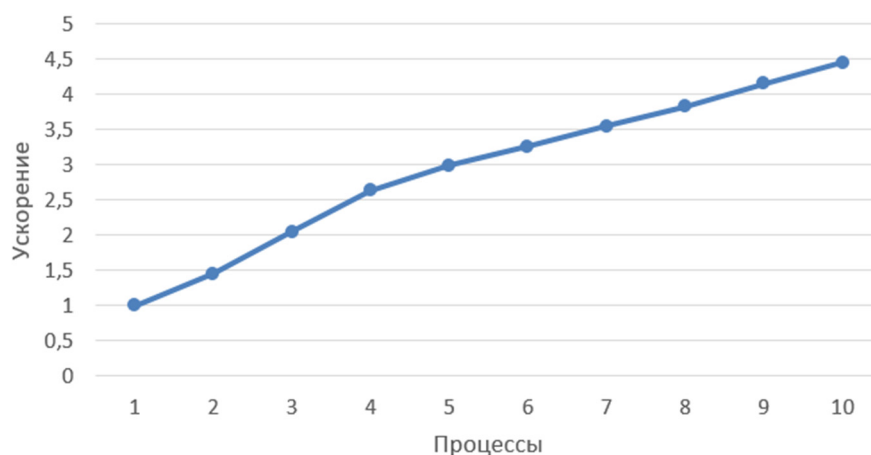


Рис. 5. Показатель ускорения в зависимости от количества процессов

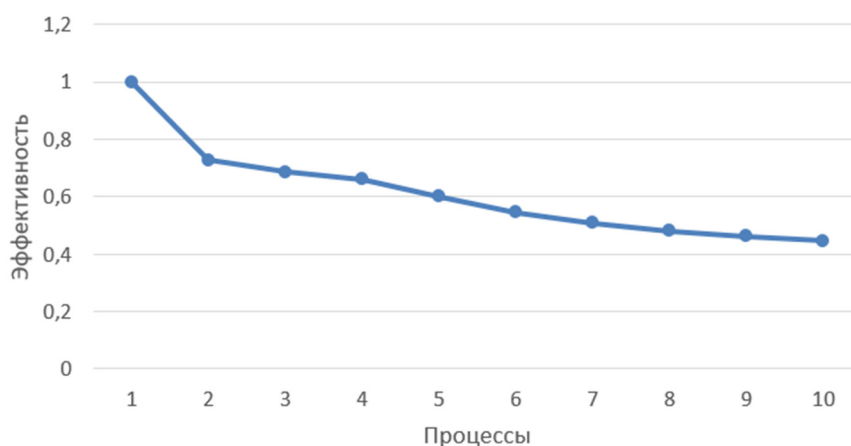


Рис. 6. Показатель эффективности в зависимости от количества процессов

Заключение

В работе рассматривалась актуальная модель решения прямой и обратной задач. Для проверки метода в некоторых расчетах были внесены различные ошибки. После этого исходные данные были сопоставлены с результатами решения обратной задачи. Результаты эксперимента показали, что шум на уровне 5 % существенно не влияет на результат решения задачи. Предложенный алгоритм восстановления неоднородности не требует начальных значений, поскольку процесс не является итеративным. Этот факт значительно упрощает процесс расчета. Использование модели с применением новой вычислительной сетки стабилизирует решение и не требует увеличения частот падающего поля. Этот факт имеет решающее значение во многих приложениях. Поскольку построенная модель требует большого количества вычислений, в работе на этапе формирования матрицы используется параллельный подход.

Список литературы

1. Дмитриев В. И. Обратные задачи геофизики. М. : МАКС Пресс, 2012. 340 с.
2. Brown B. M., Marlett M., Reyes J. M. Uniqueness for an inverse problem in electro-magnetism with partial data // J. Differential Equations. 2016. Vol. 260. P. 525–654.
3. Bakushinsky A. B., Kokurin M. Yu. Iterative Methods for Approximate Solution of Inverse Problems. New York : Springer, 2004. 291 p.
4. Beilina L., Klibanov M. Approximate Global Convergence and Adaptivity for Coefficient Inverse Problems. New York : Springer, 2012. 407 p.
5. Kabanikhin S. I., Satybaev A. D., Shishlenin M. A. Direct Methods of Solving Multidimensional Inverse Hyperbolic Problems Utrecht. VSP, 2004. 179 p.
6. Romanov V. G. Inverse Problems of Mathematical Physics. Utrecht, The Netherlands : VNU, 1986. 236 p.
7. Оленев Н. Н. Основы параллельного программирования в системе MPI. М. : ВЦ РАН, 2005. 77 с.
8. Антонов А. С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI. М. : Изд-во МГУ, 2004. 71 с.
9. Корнеев В. Д. Параллельное программирование в MPI. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. 215 с.
10. Немнюгин С. А., Стесик О. Л. Параллельное программирование для много-процессорных вычислительных систем. СПб. : БХВ-Петербург, 2002. 397 с.
11. Хуторова О. Г. Основы работы с библиотекой MPI : учеб.-метод. пособие. Казань : Казан. ун-т, 2022. 32 с.
12. Малявко А. А. Параллельное программирование на основе технологий OpenMP, MPI, CUDA : учеб. пособие. Новосибирск : НГТУ, 2015. 116 с.
13. Земляная Е. В., Башахин М. В. Введение в параллельное программирование на основе технологий MPI и OpenMP : учеб. пособие. Дубна : Государственный университет «Дубна», 2023. 101 с.
14. Смирнов Ю. Г., Цупак А. А. Математическая теория дифракции акустических и электромагнитных волн на системе экранов и неоднородных тел. М. : Русайне, 2016. 223 с.
15. Sommerfeld A. Die Greensche Funktion der Schwingungsgleichung // Jahresber. Dtsch. Math.-Ver. 1912. Bd. 21. P. 309–353.
16. Лапич А. О., Медведик М. Ю. Решение скалярной двумерной нелинейной задачи дифракции на объектах произвольной формы // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2023. Т. 165, кн. 2. С. 166–176.
17. Лапич А. О., Медведик М. Ю. Метод обобщенных и объединенных расчетных сеток для восстановления параметров неоднородностей тела по результатам измерений электромагнитного поля // Математическое моделирование. 2024. Т. 36, № 4. С. 24–36.
18. Smirnov Y. G., Tsupak A. A. Direct and inverse scalar scattering problems for the Helmholtz equation in $\mathbb{R}^m$ // J. Inverse Ill-Posed Probl. 2022. Vol. 30, № 1. P. 101–116.
19. Лапич А. О., Медведик М. Ю. Алгоритм поиска неоднородностей в обратных нелинейных задачах дифракции // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2024. Т. 166, кн. 3. С. 395–406.
20. Lapich. A. O., Medvedik M. Yu. Method for reconstruction the parameters of body inhomogeneities from the results of electromagnetic field measurements // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2024. Vol. 45, № 10. P. 4628–4635.

References

1. Dmitriev V.I. *Obratnye zadachi geofiziki = Inverse problems of geophysics*. Moscow: MAKS Press, 2012:340. (In Russ.)

2. Brown B.M., Marlett M., Reyes J.M. Uniqueness for an inverse problem in electro-magnetism with partial data. *J. Differential Equations*. 2016;260:525–654.
3. Bakushinsky A.B., Kokurin M.Yu. *Iterative Methods for Approximate Solution of Inverse Problems*. New York: Springer, 2004:291.
4. Beilina L., Klibanov M. *Approximate Global Convergence and Adaptivity for Coefficient Inverse Problems*. New York: Springer, 2012:407.
5. Kabanikhin S.I., Satybaev A.D., Shishlenin M.A. *Direct Methods of Solving Multidimensional Inverse Hyperbolic Problems Utrecht*. VSP, 2004:179.
6. Romanov V.G. *Inverse Problems of Mathematical Physics*. Utrecht, The Netherlands: VNU, 1986:236.
7. Olenev N.N. *Osnovy parallel'nogo programmirovaniya v sisteme MPI = Fundamentals of parallel programming in the MPI system*. Moscow: VTs RAN, 2005:77. (In Russ.)
8. Antonov A.S. *Parallel'noe programmirovaniye s ispol'zovaniem tekhnologii MPI = Parallel programming using MPI technology*. Moscow: Izd-vo MGU, 2004:71. (In Russ.)
9. Korneev V.D. *Parallel'noe programmirovaniye v MPI = Parallel programming in MPI*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000:215. (In Russ.)
10. Nemnyugin S.A., Stesik O.L. *Parallel'noe programmirovaniye dlya mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem = Parallel programming for multi-processor computing systems*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002:397. (In Russ.)
11. Khutorova O.G. *Osnovy raboty s bibliotekoy MPI.: ucheb.-metod. posobie = Basics of working with the MPI library.: studies.- the method. stipend*. Kazan: Kazan. un-t. 2022:32. (In Russ.)
12. Malyavko A.A. *Parallel'noe programmirovaniye na osnove tekhnologiy OpenMP, MPI, CUDA: ucheb. posobie = Parallel programming based on OpenMP, MPI, and CUDA technologies : a tutorial*. Novosibirsk: NGTU., 2015:116. (In Russ.)
13. Zemlyanaya E.V., Bashashin M.V. *Vvedeniye v parallel'noe programmirovaniye na osnove tekhnologiy MPI i OpenMP: ucheb. posobie = Introduction to parallel programming based on MPI and OpenMP technologies: a tutorial*. Dubna: Gosudarstvennyy universitet «Dubna», 2023:101. (In Russ.)
14. Smirnov Yu.G., Tsupak A.A. *Matematicheskaya teoriya difraktsii akusticheskikh i elektromagnitnykh voln na sisteme ekranov i neodnorodnykh tel = Mathematical theory of diffraction of acoustic and electromagnetic waves on a system of screens and inhomogeneous bodies*. Moscow: Rusayns, 2016:223. (In Russ.)
15. Sommerfeld A. Die Greensche Funktion der Schwingungsgleichung. *Jahresber. Dtsch. Math.-Ver.* 1912;21:309–353.
16. Lapich A.O., Medvedik M.Yu. Solving a scalar two-dimensional nonlinear diffraction problem on objects of arbitrary shape. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. fiz.-matem. Nauki = Scientific notes of Kazan University. Ser. phys.-checkmate. sciences*. 2023;165(bk.2):166–176. (In Russ.)
17. Lapich A.O., Medvedik M.Yu. The method of generalized and combined computational grids for restoring the parameters of body inhomogeneities based on the results of electromagnetic field measurements. *Matematicheskoe modelirovaniye = Mathematical modeling*. 2024;36(4):24–36. (In Russ.)
18. Smirnov Yu.G., Tsupak A.A. Direct and inverse scalar scattering problems for the Helm-holtz equation in $\mathbb{R}^m$. *J. Inverse Ill-Posed Probl.* 2022;30(1):101–116.
19. Lapich A.O., Medvedik M.Yu. Algorithm for finding inhomogeneities in inverse nonlinear diffraction problems. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Fiz.-matem. nauki = Scientific notes of Kazan University. Ser. phys.- checkmate. sciences*. 2024;166(bk.3):395–406. (In Russ.)
20. Lapich A.O., Medvedik M.Yu. Method for reconstruction the parameters of body inhomogeneities from the results of electromagnetic field measurements. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024;45(10):4628–4635.

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Владимирович Кондырев

заведующий лабораторией разработки
программного обеспечения,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kow20002204@mail.ru

Oleg V. Kondyrev

Head of the laboratory of software
development,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Олегович Лапич

ассистент кафедры математики
и суперкомпьютерного моделирования,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lapich.a@yandex.ru

Andrey O. Lapich

Assistant of the sub-department
of mathematics and supercomputer
modeling,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Михаил Юрьевич Медведик

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры математики
и суперкомпьютерного моделирования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: _medv@mail.ru

Mikhail Yu. Medvedik

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor of the
sub-department of mathematics
and supercomputer modeling,
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 19.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 08.04.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОНЛАЙН-КУРСОВ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

И. П. Бурукина

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
burukinairina@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях цифровой трансформации требуется тщательная оценка эффективности онлайн-курсов для обеспечения качественного образовательного процесса, выявления оптимальных методов обучения и своевременной коррекции учебных программ. Актуальность исследования вызвана необходимостью поиска новых решений для оценки эффективности онлайн-курсов, так как существующие методы или фокусируются исключительно на количественных показателях, что не позволяет адекватно оценить восприятие и усвоение учебного материала, или ограничиваются качественными показателями, подверженными субъективности и возможным искажениям. Неточности в оценке приводят к неверным управленческим решениям по усовершенствованию учебных материалов, неудовлетворенности учащихся, нецелесообразному использованию финансовых и временных ресурсов, что отрицательно сказывается на общем уровне образовательного процесса. Цель исследования – разработка и апробация комплексного подхода, который позволит осуществить всесторонний анализ образовательного процесса и выявить проблемные зоны, требующие коррекции. *Материалы и методы.* Методической основой исследования являются систематизация результатов анализа научной литературы, практических разработок и личный опыт автора, что позволило сформировать комплексную методологию оценки эффективности онлайн-курсов. *Результаты.* Разработана концепция, основанная на балансе качественных и количественных показателей, применении инструментов, гарантирующих достоверность и надежность данных, использовании математической модели Байеса для прогнозирования изменения эффективности курса при смене показателей. Практическая реализация продемонстрирована на примере онлайн-курса «Веб-дизайн». *Выводы.* Действия по оптимизации структуры курса, рекомендованные по результатам комплексной оценки эффективности, привели к улучшению качества образовательного процесса, повышению уровня усвоения материала и росту общей удовлетворенности учащихся.

Ключевые слова: онлайн-курсы, эффективность, комплексный подход, показатели эффективности, теорема Байеса, управленческие решения, оптимизация

Для цитирования: Бурукина И. П. Комплексный подход к оценке эффективности онлайн-курсов для принятия решений по оптимизации образовательного процесса // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 107–121. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-9

A COMPREHENSIVE APPROACH TO EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ONLINE COURSES

I.P. Burukina

Penza State University, Penza, Russia
burukinairina@gmail.com

Abstract. *Background.* In the context of digital transformation, a thorough assessment of the effectiveness of online courses is required to ensure a high-quality educational process, identify optimal teaching methods and timely correction of curricula. The relevance of the research is caused by the need to find new solutions for evaluating the effectiveness of online courses, since existing methods either focus solely on quantitative indicators, which does not allow an adequate assessment of the perception and assimilation of educational material, or are limited to qualitative indicators subject to subjectivity and possible distortions. Inaccuracies in the assessment lead to incorrect management decisions to improve educational materials, student dissatisfaction, and inappropriate use of financial and time resources, which negatively affects the overall level of the educational process. The purpose of the research is to develop and test an integrated approach that will allow for a comprehensive analysis of the educational process and identify problem areas that require correction. *Materials and methods.* The methodological basis of the research is the systematization of the results of the analysis of scientific literature, practical developments and personal experience of the author, which allowed to form a comprehensive methodology for evaluating the effectiveness of online courses. *Results.* A concept has been developed based on a balance of qualitative and quantitative indicators, the use of tools that guarantee the reliability and reliability of data, and the use of the Bayesian mathematical model to predict changes in the effectiveness of the exchange rate when indicators change. The practical implementation is demonstrated by the example of the online course "Web Design". *Conclusions.* Actions to optimize the course structure, recommended by the results of a comprehensive effectiveness assessment, led to an improvement in the quality of the educational process, an increase in the level of material assimilation and an increase in overall student satisfaction.

Keywords: online courses, efficiency, integrated approach, performance indicators, Bayes' theorem, management decisions, optimization

For citation: Burukina I.P. A comprehensive approach to evaluating the effectiveness of online courses. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(2):107–121. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-9

Введение

Онлайн-курсы постепенно занимают центральное место в современной образовательной системе, преобразуя традиционные подходы к обучению и расширяя возможности доступа к знаниям для широкого круга населения. Их популярность обусловлена множеством факторов, среди которых выделяются высокая доступность, гибкость графика учебного процесса, возможность самостоятельного выбора темпа обучения и многое другое [1]. Эти особенности делают данный формат особенно привлекательным для тех, кто стремится к знаниям, профессиональному развитию и личностному росту, независимо от своего местоположения и занятости.

Несмотря на очевидные преимущества [2], онлайн-курсы сталкиваются с рядом сложностей, касающихся оценки их эффективности. Традиционные

методы оценки, характерные для классической аудиторной формы обучения, далеко не всегда применимы в условиях дистанционного взаимодействия, что обуславливает необходимость разработки комплексных подходов, учитывающих особенности и специфику электронного обучения.

В отличие от традиционной модели передачи знаний посредством лекций и практических заданий, современные онлайн-курсы предполагают активное использование разнообразных интерактивных средств, таких как форумы, тесты, видеолекции и симуляторы. Эти многообразные формы взаимодействия формируют сложную сеть взаимоотношений, которая не поддается оценке с использованием стандартных приемов, разработанных для аудиторного формата. Кроме того, существенным фактором является дифференциация в уровнях мотивации и готовности учащихся к самостоятельному освоению учебного материала. В онлайн-курсах учащиеся вынуждены брать на себя ответственность за собственное обучение [3], что требует значительной степени самоорганизации и дисциплины. Следовательно, оценка эффективности должна учитывать не только конечные результаты тестов и экзаменов, но и степень вовлеченности учащихся в образовательный процесс. Еще одной важной задачей является учет технических аспектов. Эффективность онлайн-курсов во многом зависит от стабильности интернет-соединения, качества используемого программного обеспечения и доступности соответствующих устройств у учащихся. Любые технические сбои могут оказать негативное воздействие на восприятие курса и снизить его общую эффективность. Не менее серьезной проблемой является субъективизм при сборе и обработке данных. Во многих случаях анкетирование учащихся и преподавателей остается основным источником информации для оценки эффективности онлайн-курса, хотя этот метод подвержен влиянию индивидуальных предпочтений, эмоционального состояния опрашиваемых и прочих факторов, способных исказить итоговый результат. Отсутствие объективных индикаторов (статистика посещений курсов, активность пользователей на платформе и т.д.) лишает исследователей возможности составить полное представление об эффективности образовательного процесса. Сложность связана с недостаточной интеграцией различных уровней анализа. Рассматриваются либо индивидуальные успехи учащегося (микроуровень), либо общие тенденции в образовании (макроуровень). Между тем для глубокого понимания образовательного процесса требуется синтез этих двух уровней, позволяющий выявить причинно-следственные связи и предложить действенные стратегии управления.

Преодоление обозначенных трудностей требует комплекса мер, обеспечивающих множественность показателей эффективности, проведение многоаспектных исследований, адаптацию оценочных процедур к конкретным условиям реализации образовательных программ и получение надежных выводов, которые послужат основанием для принятия взвешенных управленческих решений.

На сегодня существует значительное разнообразие методик и моделей оценки эффективности онлайн-курсов [4], однако до сих пор не разработана единая, общепризнанная схема, которая могла бы стать универсальным стандартом. Современные методологические и методические подходы требуют дальнейшей доработки и усовершенствования для достижения большей точности

и объективности. Необходимо разработать более сбалансированный подход, который сочетает в себе как качественные, так и количественные показатели оценки, учитывает мнение и восприятие учащихся, реальные показатели активности и результаты обучения на онлайн-курсе.

Целями исследования являются разработка и апробация комплексного подхода к оценке эффективности онлайн-курсов, который позволит не только определять степень достижения образовательных целей, но и оперативно выявлять проблемные зоны учебного материала и корректировать образовательный процесс в режиме реального времени.

Материалы и методы

Современное электронное образование тесно связано с условиями неопределенности, которые возникают в результате постоянного изменения социально-экономического контекста [5], внедрения новых технологий и изменяющихся ожиданий студентов. Оценка эффективности использования онлайн-курсов в условиях неопределенности представляет сложную задачу и требует учета множества факторов, как внутренних (связанных с учебным заведением и обучением), так и внешних (появляющихся со стороны общества, технологий и политики). Это оценка того, насколько хорошо онлайн-курсы достигают своих образовательных целей и требований.

Оценка эффективности онлайн-курсов играет важную роль в процессе принятия управленческих решений, направленных на достижение стратегических целей образовательных учреждений и обеспечение высокого уровня качества предоставляемых услуг. Этот процесс способствует выявлению сильных сторон и недостатков существующих курсов, что позволяет своевременно корректировать учебные материалы и методы преподавания, адаптируя их к потребностям целевой аудитории и изменяющимся условиям рынка.

В ходе исследований и практической деятельности в области образования учеными и специалистами было создано несколько моделей оценки эффективности обучения [6, 7], большая часть которых сосредоточена на качественной оценке, хотя отдельные модели предполагают количественную оценку.

Комплексный подход – это методология, ориентированная на всестороннее изучение различных аспектов эффективности онлайн-курсов в электронном обучении, которая основывается на системном подходе, предполагающем поэтапное выполнение ряда взаимосвязанных действий и анализ множества факторов.

Определение объекта и предмета исследования – осуществляется выбор конкретных онлайн-курсов, формулируются ключевые аспекты, подлежащие анализу (педагогические стратегии, технологическая поддержка, мотивационные факторы).

Выделение показателей для оценки эффективности – определяются показатели, которые могут включать как объективные метрики (процент завершенных заданий, средний балл за тесты и т.д.), так и субъективные оценки (удовлетворенность учащихся, мнение экспертов и т.д.). Важным моментом является обеспечение сбалансированности показателей, чтобы учесть как качественную, так и количественную составляющую оценки.

Выбор инструментария для сбора данных – подбираются инструменты и методы, обеспечивающие достоверность и надежность получаемой информации (опросы, тестирование, показатели платформы электронного обучения и т.д.).

Сбор эмпирических данных – собирается информация посредством выбранных инструментов с комплексом мер для обеспечения репрезентативности выборки и точности полученных данных, с процедурами по минимизации ошибок измерения и предвзятости в сборе данных.

Обработка собранных данных – проводится обработка полученных данных с применением как количественных (статистический анализ и т.д.), так и качественных (интерпретация ответов на открытые вопросы и т.д.) методов, устанавливаются причинно-следственные связи между различными показателями.

Моделирование и прогнозирование – подбираются или разрабатываются математические модели, позволяющие предсказать изменение эффективности онлайн-курса при смене показателей.

Формирование выводов и разработка рекомендаций – формируются выводы об эффективности онлайн-курса и практические рекомендации по оптимизации образовательного процесса, которые могут затрагивать изменение структуры курса, внедрение педагогических стратегий, модернизацию технической инфраструктуры и прочие аспекты.

Реализация предложенных рекомендаций – вносятся соответствующие изменения в структуру или содержание онлайн-курса, после чего осуществляется повторная оценка его эффективности, направленная на верификацию полученных результатов и анализа степени их влияния на образовательный процесс.

Выполнение всех этапов позволит провести оценку эффективности онлайн-курса, но важно помнить, что оценка – это не конечный результат [8], она служит средством для выявления проблемных зон, где требуется адаптировать содержание курса, корректировать методы контроля знаний, совершенствовать педагогические подходы или улучшать техническую инфраструктуру.

Показатели для оценки эффективности онлайн-курсов (рис. 1) включают широкий спектр данных, которые можно разделить на две основные группы: объективные и субъективные. Каждый показатель имеет свои особенности [9], но для получения всесторонней оценки образовательного процесса, выявления сильных и слабых сторон в рамках предложенной методологии использовалась комбинация нескольких показателей.

Одна из важнейших целей онлайн-курса – удовлетворенность учащихся. Как видно из рис. 1, для оценки уровня удовлетворенности можно использовать как качественные показатели (опросы и анкеты), так и количественные (продолжительность участия). Вовлеченность и активность являются не менее важными индикаторами успешного обучения, которые можно отслеживать по количеству посещений платформы, продолжительности индивидуальных занятий, участию в форумах и чатах, выполнению домашних заданий. Оценка эффективности зависит и от способности учащихся применять полученные знания на практике, как доказательство того, что они не только запомнили информацию, но и сумели использовать ее в реальной жизни. Часто при оценке эффективности учитываются сведения о завершении курса (Completion Rate) [10].

Низкое значение, как правило, указывает на проблемы с содержанием и структурой; однако ретенцию важно рассматривать в комплексе с другой информацией, поскольку некоторые учащиеся, которые начали курс, меняют свое мнение по субъективным причинам, решив, что им не подходит программа.

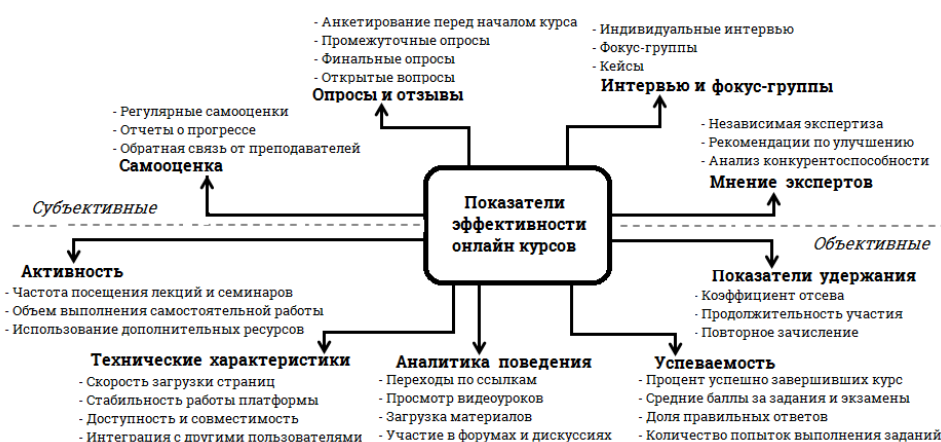


Рис. 1. Показатели оценки эффективности онлайн-курса

Многие из представленных показателей можно получить самостоятельно или рассчитать вручную, без применения аналитических инструментов или программного обеспечения. Большинство показателей универсальны и применимы как для оценки отдельных онлайн-курсов, так и для комплексной оценки других учебных продуктов.

При выборе математической модели для анализа данных и принятия обоснованных решений по улучшению качества онлайн-курса было решено применить байесовский подход к обработке неопределенностей [11, 12]. Данный метод позволяет делать вывод относительно успешности использования онлайн-курсов на основе вероятностных данных. Байесовская статистика основана на использовании априорных знаний и обновлении их по мере поступления новых данных, что делает ее эффективным инструментом для обработки неопределенностей и динамического обновления выводов. Применение данного подхода позволит не только оценить текущие результаты, но и предсказать будущее поведение системы, что способствует оптимизации образовательного процесса и повышению качества предлагаемых онлайн-курсов.

Теорема Байеса выражается формулой:

$$P(H | D) = (P(D | H) \times P(H)) / P(D),$$

где H – гипотеза; D – новое доказательство (данные); $P(H)$ – априорная вероятность гипотезы – начальное убеждение об эффективности онлайн-курса до сбора данных; $P(D | H)$ – вероятность наблюдения доказательства D , если гипотеза H верна; $P(D)$ – общая вероятность наблюдения доказательства D ; $P(H | D)$ – апостериорная вероятность гипотезы после получения новых данных [13].

На начальном этапе необходимо задать априорные вероятности различных исходов на основе имеющихся данных или экспертных оценок: $P(H_1)$,

$P(H_2), P(H_3)$. На каждом этапе обучения можно собирать новые данные и использовать их для пересмотра оценки вероятности успешного завершения курса. Если предшествующей информации нет, рекомендуется использовать неинформативный априор, который равномерно распределит вероятность по всем возможным значениям параметра. По мере продолжения курса и сбора новых данных можно повторять этот процесс, каждый раз пересматривая оценки на основе последних наблюдений. Это позволит динамически отслеживать прогресс учащихся и вовремя вмешаться, если возникнут затруднения.

Байесовский подход позволяет интегрировать предыдущие знания, опыт, экспертные мнения в оценку и обновлять их по мере поступления новых данных [14]. Кроме того, байесовский подход может комбинировать различные типы данных (результаты тестов, опросы, активность на платформе и т.п.), что является несомненным преимуществом при комплексной оценке. Данный подход позволяет разрабатывать иерархические модели для анализа данных на разных уровнях оценки как внутри одного учебного онлайн-курса, так и в рамках разных учебных групп учащихся.

Однако, несмотря на обозначенные преимущества, следует помнить и о потенциальных проблемах использования байесовского подхода. Во-первых, полученные модели могут быть чрезвычайно сложными [15] и требовать больших вычислительных ресурсов и времени. Во-вторых, выбор подходящих априорных значений может быть непростой задачей, так как требует определенного опыта и знаний [16]; субъективные априорные значения могут привести к ошибке, если не являются обоснованными. Необходимо также периодически пересматривать модель и адаптировать ее к изменяющимся условиям [17]. Помимо этого, следует помнить о сложности интерпретации полученных результатов и риске переоценить их значимость, если не учитывать все факторы и неопределенности.

Исследования показали, что из-за сложности установления прямой причинно-следственной связи между текущими результатами обучения и посткурсовыми результатами может возникнуть неточность в оценке эффективности использования онлайн-курсов [7]. Это объясняется тем, что в отличие от традиционных форматов, где обратная связь предоставляется незамедлительно, в случае онлайн-курсов процесс освоения материала может растянуться во времени, особенно если речь идет о самостоятельном изучении. Кроме того, многие компетенции, приобретаемые учащимися в ходе прохождения онлайн-курсов, требуют практики и закрепления, что может занять значительное количество времени, и только намного позднее можно наблюдать устойчивые изменения в уровнях знаний и умений учащихся. Снизить проблему отложенных результатов можно за счет стратегий, направленных на учет временных лагов и проведение долгосрочных наблюдений.

Хорошо себя зарекомендовали в работе по оценке эффективности онлайн-курсов в ситуациях, когда немедленное проявление результатов невозможно или затруднено, модели Киркпатрика, Филлипса, Стаффлбима, CIL, Тайлера и Скривенса.

Модель Киркпатрика (Kirkpatrick Model) состоит из четырех уровней: реакции (оценка удовлетворенности участников обучения), обучения (измерение того, что участники узнали и каких навыков достигли), поведения (анализ изменений в поведении сотрудников после обучения) и результатов (оценка влияния обучения на бизнес-результаты организации) [18].

Модель Джека Филлипса (Model Jack Phillips's) представляет собой расширение модели Киркпатрика и включает пять уровней: удовлетворенность (аналог первого уровня модели Киркпатрика), знания (соответствует второму уровню модели Киркпатрика), применение (оценка использования новых знаний и навыков на практике), бизнес-результат (измерение влияния обучения на ключевые показатели бизнеса) и возврат на инвестиции (расчет экономической выгоды от проведенного обучения) [19].

Модель Стаффлбима (Stufflebeam Model) фокусируется на оценке поведения сотрудников и улучшения результатов в реальных рабочих условиях для того, чтобы объективно определить вклад обучения в достижение целей компании. Данная модель подчеркивает важность выбора сотрудников, проходящих обучение, необходимость учитывать их квалификацию и способность справляться с задачами. Основные аспекты данной модели – это подбор персонала, управление персоналом и контроль качества [20].

Модель CIL (Continuous Improvement Learning) фокусируется на постоянном совершенствовании и модернизации образовательных процессов. Она состоит из трех основных компонентов: диагностики проблем, планирования и реализации улучшений, мониторинга и оценки. Основная идея модели CIL заключается в непрерывном анализе и оптимизации учебного процесса для того, чтобы повысить его эффективность [19].

Модель Тайлера (Tylers Objectives Approach) описывает процесс разработки образовательных программ, основываясь на целях обучения, содержании программы, методах преподавания и оценке результатов. Данная модель подчеркивает важность согласования всех компонентов учебного процесса с потребностями учащихся и целями образования [20].

Модель Скривенса (Scrivens Focus On Outcomes) акцентирует внимание на приобретении учащимися навыков и компетенций, которые позволят им добиться успеха в карьере, и включает три элемента: освобождение от барьеров, наставление и самостоятельное обучение [19].

Каждая из перечисленных моделей обладает определенными преимуществами и ограничениями, и выбор той или иной модели определяется целями курса, характеристиками целевой аудитории и особенностями образовательной среды. Однако комбинация нескольких указанных моделей при комплексном подходе к оценке эффективности онлайн-курсов обеспечит более точный и полезный набор данных, необходимых для принятия и обоснования стратегических решений.

Результаты и обсуждение

Практическая реализация комплексного подхода к оценке эффективности онлайн-курсов для принятия решений по оптимизации образовательного процесса продемонстрирована на примере дисциплины «Веб-дизайн», разработанной автором И. П. Бурукиной и доступной на платформе электронного обучения Moodle ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Веб-дизайн является важной частью ИТ-инфраструктуры, необходимой для функционирования современных интернет-ресурсов, что обуславливает растущую популярность таких курсов [21]. С увеличением количества онлайн-курсов по веб-дизайну возрастают требования к их качеству. Современные онлайн-курсы по веб-дизайну должны быть актуальными, практико-ориентированными и удобными для пользователей, а также должны предоставлять

разнообразные форматы обучения и всестороннюю поддержку со стороны преподавателя.

Онлайн-курс «Веб-дизайн» состоит из пяти модулей, которые содержат теоретический материал, рекомендации для выполнения практических заданий, темы практических заданий. Помимо этого, курс включает в себя рекомендации для выполнения итогового задания, примеры оформления итогового задания, форум, доску объявлений, тест и список рекомендованной литературы. Онлайн-курс охватывает все основные аспекты веб-дизайна, начиная с базовых понятий и заканчивая созданием полноценного проекта и портфолио. Учащиеся получают практические навыки и могут уверенно работать над реальными проектами после окончания онлайн-курса. Оценка эффективности данного курса включает в себя несколько этапов, она направлена на выявление сложных или проблемных компонент, требующих доработки и усовершенствования.

Следуя комплексному подходу, перед началом онлайн-курса необходимо четко определить цели, которые актуальны для учащегося: изучение основ веб-дизайна, создание функционального и визуально привлекательного сайта, освоение инструментов для проектирования и прототипирования. Выбранные цели конкретные, измеримые, достижимые, актуальные и ограниченные по времени (SMART) [22]. Инструменты для сбора данных: тесты, практические задания, анкеты, контент-анализ материалов курса, сведения об активности учащихся; собранные данные: процент учащихся, завершивших обучение, средний балл по тестам и заданиям, количество положительных отзывов, общие успехи учащихся в создании финальных проектов, посещаемость, участие в форумах. Можно расширить список показателей эффективности, которые объективно оценивают прогресс участников, качество учебного материала и общую удовлетворенность процессом обучения (рис. 2).



Рис. 2. Дополнительные показатели для оценки эффективности онлайн-курсов

Далее проводится анализ собранных данных, на основании которого обозначаются ключевые параметры оценки:

- вероятность успешного завершения онлайн-курса $P(H_1)$;
- вероятность высокого уровня усвоения материала $P(H_2)$;

– вероятность активного участия и вовлеченности участника $P(H_3)$.

Начальные (априорные) вероятности для каждого параметра установлены на основании анализа данных о прохождении данной группой учащихся похожих онлайн-курсов и экспертных оценок: $P(H_1)=0,7$, $P(H_2)=0,6$, $P(H_3)=0,8$.

Можно перейти к сбору данных о поведении учащихся во время изучения онлайн-курса при помощи функционала платформы Moodle: посещаемость лекций D_1 , выполнение практических заданий D_2 , участие в форумах D_3 . Используя эти данные, определяют условные вероятности для каждого параметра:

– $P(H_1 | D_1=0,8)=0,85$ (если 80 % и более учащихся посещали лекции, вероятность успешного завершения онлайн-курса увеличивается);

– $P(H_2 | D_2=0,9)=0,75$ (если 90 % и более учащихся выполняли практические задания, вероятность успешного завершения онлайн-курса увеличивается);

– $P(H_3 | D_3=0,7)=0,95$ (если учащиеся показывали высокую активность в обсуждениях на форуме, вероятность вовлеченности высока).

После этого обновляются априорные вероятности на основе новых данных, проводится расчет и вычисляются апостериорные вероятности для каждого параметра:

– $P(H_1 | D_1=0,8)=0,747$;

– $P(H_2 | D_2=0,9)=0,671$;

– $P(H_3 | D_3=0,7)=0,915$.

Полученные вероятности указывают на то, что у рассматриваемой группы учащихся есть высокие шансы успешно завершить онлайн-курс, хотя они могут не достичь глубокого понимания материала; при этом ожидается активное участие группы в учебном процессе.

На основании полученных результатов разработчик онлайн-курса принимает решение о совершенствовании учебного материала. Чтобы повысить уровень усвоения можно добавить видеоуроки, интерактивные задания, групповые проекты; для учащихся, испытывающих трудности с пониманием сложных тем, ввести дополнительные консультации. Можно еще предложить задания, требующие самостоятельного устранения проблем и разбора собственных решений, что также поможет учащимся глубже погрузиться в рассматриваемую тему. С учетом того, что учащиеся были активны в процессе обучения, рекомендуется предоставить им самостоятельную возможность выбора заданий и тем для изучения. Для углубления знаний по интересующим вопросам расширить список вспомогательных материалов (статьи, книги и т.п.).

Результат применения указанных решений по оптимизации онлайн-курса «Веб-дизайн» – это улучшение академической успеваемости и повышение средних оценок учащихся, увеличение уровня усвоения учебного материала, рост удовлетворенности у обучающихся, получение положительных отзывов о курсе, а также рост числа рекомендаций данного курса для изучения последующим группам учащихся.

Заключение

Разработанная комплексная методика оценки эффективности онлайн-курсов с последующим принятием решений по оптимизации образовательного процесса является важным инструментом для повышения качества образования и расширения его доступности. Данный подход учитывает специфику онлайн-обучения, ограничения существующих методов оценки эффективности, потенциал платформ онлайн-обучения и инструментов по сбору данных, требования педагогического дизайна и дизайна учебного опыта (Learning Experience Design), возможности математического моделирования для прогнозирования образовательных результатов, а также перспективы использования современных цифровых технологий. Все это позволяет в процессе комплексного подхода оперативно выявлять проблемы онлайн-курсов и принимать обоснованные решения по совершенствованию и коррекции учебных программ в реальном времени.

Предложенный подход служит отличным инструментом при разработке и реализации адаптированных программ обучения, включая инклюзивные образовательные инициативы. Он позволяет учесть индивидуальные особенности каждого учащегося: когнитивные способности, физические возможности или культурные особенности, главное – верно определить образовательные потребности и цели учащегося и выбрать показатели для оценки эффективности онлайн-курса. Практическая реализация управленческих решений по оптимизации курса позволит создать максимально благоприятные условия для успешного обучения всех категорий учащихся.

Однако следует знать и о нескольких ключевых недостатках рассматриваемого подхода. Во-первых, это сложность сбора и анализа большого объема данных, что может потребовать значительных временных затрат. Во-вторых, это риск субъективной интерпретации результатов, что может повлиять на точность выводов. В-третьих, проблемы отложенных результатов, о которых писали выше.

Для преодоления этих трудностей предлагается использовать возможности искусственного интеллекта [23, 24], внедряя инновационные механизмы автоматизации, анализа данных [25] и персонализации в этапы комплексной оценки. Интеграция искусственного интеллекта ускорит трансляцию управленческих решений по оптимизации и совершенствованию учебных материалов, повысит точность, оперативность и индивидуализацию образовательного процесса, что приведет к значительному улучшению качества онлайн-курсов.

Список литературы

1. Najafi H. [et al.]. University of Toronto instructors' experiences with developing MOOCs // International Review of Research in Open and Distributed Learning. 2015. Т. 16, № 3. Р. 233–255.
2. Семаева О. В. Дистанционное обучение в контексте современных реалий // Мир науки. Педагогика и психология. 2020. Т. 8, № 4. С. 21.
3. Tsironis A., Katsanos C., Xenos M. Comparative usability evaluation of three popular MOOC platforms // 2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 2016. Р. 608–612.

4. Петькова Ю. Р. История развития дистанционного образования. Положительные и отрицательные стороны МООС // Успехи современного естествознания. 2015. № 3. С. 199–204.
5. 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.
6. Kirkpatrick D. L. Techniques for Evaluation Training Programs // Journal of the American Society of Training Directors. 1959. № 13. P. 21–26.
7. Тлехурай-Берзегова Л. Т., Бюллер Е. А., Чиназирова С. К. Этапы разработки системы обучения персонала и методы оценки ее эффективности: аналитический обзор // Институты и механизмы инновационного развития: мировой опыт и российская практика. 2021. С. 220–226.
8. Арыстанбек А., Жагпарова С. Эффективное планирование урока как основа качественного образования: теоретические основы и рекомендации // Білім-Образование. 2023. Т. 105, № 2. С. 60–71.
9. Ильина Л. А. Практика оценки эффективности вложений в обучение на промышленных предприятиях Российской Федерации // Вестник Самарского муниципального института управления. 2009. № 10. С. 43–53.
10. Суровицкая Г. В. Модели реализации инновационной политики университетов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2 (46). С. 77–86.
11. Исаева М. К. Процесс принятия решений на основе метода Байеса // Стратегическое планирование и развитие предприятий. 2017. С. 255–258.
12. Кожомбердиева Г. И., Бураков Д. П. Об использовании формулы Байеса в задачах оценивания качества // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2017. Т. 1. С. 31–34.
13. Agresti A., Hitchcock D. B., Bayesian Inference for Categorical Data Analysis, Statistical Methods and Applications // Journal of the Italian Statistical Society. 2005. № 14. P. 297–330.
14. Ветров Д. П., Кропотов Д. А. Байесовские методы машинного обучения : учеб. пособие. М., 2007. С. 88.
15. Босов А. В., Мартюшова Я. Г., Наумов А. В., Сапунова А. П. Байесовский подход к построению индивидуальной траектории пользователя в системе дистанционного обучения // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14, № 3. С. 86–93.
16. Gelman A., Carlin J., Stern H., [et al.]. Bayesian Data Analysis. 3rd ed. CRC Press, 2013.
17. Артамонова Ю. А. О теореме Байеса // Математика, информатика, физика: проблемы и перспективы. 2023. С. 87–90.
18. Sudipta P., Burman R. R., Singh R. Training effectiveness evaluation: Advancing a Kirkpatrick model based composite framework // Evaluation and Program Planning. 2024. Vol. 107. P. 102494.
19. Phillips P. P., Phillips J. J. How to Measure the Return on your HR Investment // Strategic HR Review. 2002. Vol. 1, iss. 4. P. 1–9.
20. Chen R. [et al.]. Task-specific parameter decoupling for class incremental learning // Information Sciences. 2023. Т. 651. P. 119731.
21. Ryndina S. V., Kulikova S. V., Mikhailova K. D. Custom Internet of things: the problem of data protection // Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society. 2020. № 2 (34). doi: 10.21685/2227-8486-2020-2-11
22. Максимова Е. А., Максимова Т. П. Smart-контракт как инструмент современных цифровых технологий: возможности и ограничения // Экономическое развитие в XXI веке: тенденции, вызовы, перспективы. 2019. С. 225.

23. Стюарт Р., Питер Н. Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. 2-е изд. М. : Вильямс, 2007. 1408.
24. Колпакова К. А., Волкова А. Д. Вклад в развитие искусственного интеллекта Джона Маккарти // Изобретатели и их изобретения : сб. тезисов работ участников XIV Всерос. студенческой исслед. конф., посвящ. 165-летней годовщине со дня рождения русского физика Александра Степановича Попова / сост. О. В. Сафронова, О. С. Богачева. Тихорецк : ТТЖТ – филиал РГУПС, 2024. С. 240.
25. Николенко С. И., Кадуринов А., Архангельская Е. Глубокое обучение: погружение в мир нейронных сетей. СПб. : Питер, 2023. 476 с.

References

1. Najafi H. et al. University of Toronto instructors' experiences with developing MOOCs. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*. 2015;16(3):233–255.
2. Semaeva O.V. Distance learning in the context of modern realities. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya = The world of science. Pedagogy and psychology*. 2020;8(4):21. (In Russ.)
3. Tsironis A., Katsanos C., Xenos M. Comparative usability evaluation of three popular MOOC platforms. *2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2016:608–612.
4. Pet'kova Yu.R. The history of the development of distance education. Positive and negative sides of the MOE. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = The successes of modern natural science*. 2015;(3):199–204. (In Russ.)
5. Bozhday A.S., Sviridova V.V. The methodology of numerical assessment of the level of digital transformation of priority areas of socio-economic processes in the regions. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2023;(2):172–184. (In Russ.)
6. Kirkpatrick D.L. Techniques for Evaluation Training Programs. *Journal of the American Society of Training Directors*. 1959;(13):21–26.
7. Tlekhray-Berzegova L.T., Byuller E.A., Chinazirova S.K. Stages of personnel training system development and methods of evaluating its effectiveness: an analytical review. *Instituty i mekhanizmy innovatsionnogo razvitiya: mirovoy opyt i rossiyskaya praktika = Institutions and mechanisms of innovative development: international experience and Russian practice*. 2021:220–226. (In Russ.)
8. Arystanbek A., Zhagparova S. Effective lesson planning as the basis of quality education: theoretical foundations and recommendations. *Bilim-Obrazovanie = Bilim-Education*. 2023;105(2):60–71. (In Russ.)
9. Il'ina L.A. The practice of evaluating the effectiveness of investments in training in industrial enterprises of the Russian Federation. *Vestnik Samarskogo munitsipal'nogo instituta upravleniya = Bulletin of the Samara Municipal Institute of Management*. 2009;(10):43–53. (In Russ.)
10. Surovitskaya G.V. Models for the implementation of university innovation policy. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2023;(2):77–86. (In Russ.)
11. Isaeva M.K. The Bayesian decision-making process. *Strategicheskoe planirovanie i razvitie predpriyatiy = Strategic planning and enterprise development*. 2017:255–258. (In Russ.)
12. Kozhombardieva G.I., Burakov D.P. On the use of Bayes formula in quality assessment tasks. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam = International Conference on Soft Computing and Measurements*. 2017;1:31–34. (In Russ.)

13. Agresti A., Hitchcock D.B. Bayesian Inference for Categorical Data Analysis, Statistical Methods and Applications. *Journal of the Italian Statistical Society*. 2005;(14):297–330.
14. Vetrov D.P., Kropotov D.A. *Bayesovskie metody mashinnogo obucheniya: ucheb. posobie = Bayesian Machine Learning Methods : a tutorial*. Moscow, 2007:88. (In Russ.)
15. Bosov A.V., Martyushova Ya.G., Naumov A.V., Sapunova A.P. A Bayesian approach to building an individual user trajectory in a distance learning system. *Informatika i ee primeneniya = Computer science and its applications*. 2020;14(3):86–93. (In Russ.)
16. Gelman A., Carlin J., Stern H. et al. *Bayesian Data Analysis. 3rd ed*. CRC Press, 2013.
17. Artamonova Yu.A. About Bayes' theorem. *Matematika, informatika, fizika: problemy i perspektivy = Mathematics, computer science, physics: problems and prospects*. 2023:87–90. (In Russ.)
18. Sudipta P., Burman R. R., Singh R. Training effectiveness evaluation: Advancing a Kirkpatrick model based composite framework. *Evaluation and Program Planning*. 2024;107:102494.
19. Phillips P.P., Phillips J.J. How to Measure the Return on your HR Investment. *Strategic HR Review*. 2002;1(4):1–9.
20. Chen R. et al. Task-specific parameter decoupling for class incremental learning. *Information Sciences*. 2023;651:119731.
21. Ryndina S.V., Kulikova S.V., Mikhailova K.D. Custom Internet of things: the problem of data protection. *Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society*. 2020;(2). doi: 10.21685/2227-8486-2020-2-11
22. Maksimova E.A., Maksimova T.P. Smart contract as a tool of modern digital technologies: possibilities and limitations. *Ekonomicheskoe razvitie v XXI veke: tendentsii, vyzovy, prespektivy = Economic development in the 21st century: trends, challenges, prospects*. 2019:225. (In Russ.)
23. Styuart R., Piter N. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod: per. s angl. 2-e izd. = Artificial Intelligence: a modern approach : translated from English. 2nd ed*. Moscow: Vil'yams, 2007:1408. (In Russ.)
24. Kolpakova K.A., Volkova A.D. John McCarthy's contribution to the development of artificial intelligence. *Izobretateli i ikh izobreteniya: sb. tezisov rabot uchastnikov XIV Vseros. studencheskoy issled. konf., posvyashch. 165-letney godovshchine so dnya rozhdeniya russkogo fizika Aleksandra Stepanovicha Popova = Inventors and their inventions : collection of abstracts of works by participants of the XIV All-Russian Academic Research. conf., dedication. 165th anniversary of the birth of Russian physicist Alexander Stepanovich Popov*. Tikhoretsk: TTZhT – filial RGUPS, 2024:240. (In Russ.)
25. Nikolenko S.I., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie: pogruzhenie v mir neyronnykh setey = Deep learning: diving into the world of neural networks*. Saint Petersburg: Piter, 2023:476. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Петровна Бурукина

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: burukinairina@gmail.com

Irina P. Burukina

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

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

Поступила в редакцию/Received 06.02.2025

Поступила после рецензирования/Revised 23.04.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ВНУТРИСОСУДИСТЫХ КАТЕТЕРОВ

Е. Д. Карташова¹, А. Ю. Муйземнек²

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

¹katrina89@yandex.ru, ²muyzemnek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Создание конкурентоспособных изделий является основной задачей различных отраслей промышленного производства. Решение данных задач возможно за счет использования полимерных слоистых композиционных материалов. Примером использования таких материалов в медицине являются внутрисосудистые катетеры, трубки которых состоят из двух полимерных слоев, между которыми находится металлическая сетка или ткань. Актуальность работы обусловлена тем, что для создания новых конкурентоспособных внутрисосудистых катетеров необходимо иметь полное представление о конструкции и физико-механических свойствах композиционных материалов хорошо зарекомендовавших себя внутрисосудистых катетеров конкурентов. Целью работы является определение конструкции и физико-механических свойств композиционных материалов диагностических и проводниковых внутрисосудистых катетеров, т.е. их реверс-инжиниринг. *Материалы и методы.* В качестве исследуемых выбраны внутрисосудистые катетеры, имеющие полимерно-металлическую композиционную трубку на основе матрицы из нейлона и армирующего из нержавеющей стали. Такие трубки имеют и диагностические, и проводниковые внутрисосудистые катетеры. Разработаны и использованы оригинальные методики измерения размеров внутрисосудистых катетеров, включая размеры металлической оплетки, определения изгибной жесткости катетера при различных температурах, включая режим термоциклирования и выдержки при постоянной температуре. *Результаты.* Разработана последовательность реверс-инжиниринга внутрисосудистых катетеров, имеющих в своем составе трубки из полимерно-металлических композиционных материалов, определены характеристики физико-механических свойств компонентов композита и его инженерные константы. *Выводы.* Разработанная последовательность реверс-инжиниринга полимерно-металлических композиционных материалов позволяет определить характеристики физико-механических свойств компонентов композита и его инженерные константы.

Ключевые слова: внутрисосудистый катетер, полимерно-металлический композиционный материал, нейлон, нержавеющая сталь, изгибная жесткость, температура, устройство для определения изгибной жесткости, испытания

Для цитирования: Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Реверс-инжиниринг внутрисосудистых катетеров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 122–133. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-10

REVERSE ENGINEERING OF INTRAVASCULAR CATHETERS

E.D. Kartashova¹, A.Yu. Muzemnek²

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

¹katrina89@yandex.ru, ²muzemnek@yandex.ru

Abstract. *Background.* The creation of competitive products is the main task of various branches of industrial production. The solution of these problems is possible due to the use of polymer layered composite materials. An example of their use in medicine are intravascular catheters, the tubes of which consist of several polymer layers that alternate with layers of metal mesh or fabric. The relevance of the work is due to the fact that in order to create new competitive intravascular catheters, it is necessary to have a complete understanding of the design and physical and mechanical properties of composite materials of well-proven intravascular catheters of competitors. The purpose of the work is to determine the design and physical and mechanical properties of composite materials of diagnostic and guiding intravascular catheters. *Materials and methods.* The subjects of the study were intravascular catheters with a polymer-metal composite tube based on a nylon matrix and stainless steel reinforcement. Such tubes have both diagnostic and conductive intravascular catheters. Original methods for measuring the sizes of intravascular catheters, including the sizes of the metal braid, determining the bending rigidity of the catheter at different temperatures, including the thermocycling mode and holding at a constant temperature, have been developed and used. *Results.* A sequence of reverse engineering of intravascular catheters containing tubes made of polymer-metal composite materials has been developed, the characteristics of the physical and mechanical properties of the composite components and its engineering constants have been determined. *Conclusions.* The developed sequence of reverse engineering of polymer-metal composite materials allows to determine the characteristics of the physical and mechanical properties of the composite components and its engineering constants.

Keywords: intravascular catheter, polymer-metal composite material, nylon, stainless steel, bending stiffness, temperature, bending stiffness tester, testing

For citation: Kartashova E.D., Muzemnek A.Yu. Reverse engineering of intravascular catheters *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):122–133. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-10

Введение

Создание конкурентоспособных изделий является основной задачей различных отраслей промышленного производства. Решение данных задач возможно за счет использования полимерных слоистых композиционных материалов. Примером использования таких в медицине являются внутрисосудистые катетеры, трубки которых состоят из двух полимерных слоев, между которыми находится металлическая сетка или ткань. Актуальность работы обусловлена тем, что для создания новых конкурентоспособных внутрисосудистых катетеров необходимо иметь полное представление о конструкции и физико-механических свойствах композиционных материалов внутрисосудистых катетеров конкурентов. Целью работы является определение конструкции и физико-механических свойств композиционных материалов диагностических и проводниковых внутрисосудистых катетеров, т.е. реверс-инжиниринг.

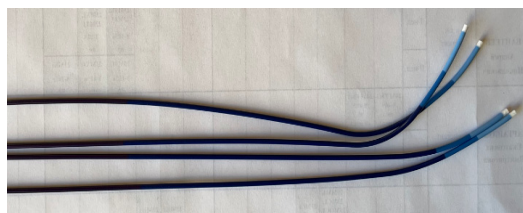
Внутрисосудистый катетер – трубчатое изделие, одноканальное или многоканальное, предназначенное для частичного, полного или имплантируемого введения в сердечно-сосудистую систему с целью диагностики и/или в терапевтических целях¹. Внутрисосудистый катетер состоит из трубки, канюли, переходника-усилителя, соединительного узла и порт-системы.

Различают диагностические и проводниковые катетеры. Диагностические катетеры используются для диагностических исследований. С их помощью вводится контраст в исследуемые артерии. Проводниковые катетеры используются для лечебных манипуляций. Они обеспечивают доставку интервенционных устройств, таких как баллонные катетеры и стенты.

Внешний вид внутрисосудистых катетеров показан на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид внутрисосудистых катетеров:
а – диагностический «Панорама»; б – проводниковый «Аккорд»

В лечебные учреждения катетеры поступают в упаковке (рис. 2), на которой приводятся основные характеристики катетера.



Рис. 2. Внутрисосудистый катетер марки HS GF в упаковке (пример)

Проведение реверс-инжиниринга потребовало разработки следующих методик измерения наружного и внутреннего диаметров катетеров:

- определения геометрических размеров металлической оплетки катетера;
- определения изгибной жесткости катетера при нормальной температуре без вырезки лабораторных образцов;

¹ ГОСТ ISO 1055-1-2021. Катетеры внутрисосудистые однократного применения стерильные.

- определение изгибной жесткости катетера после нагрева до заданной температуры и построение графиков зависимостей изгибной жесткости катетеров от температуры их нагрева в диапазоне температур от 100 до 140 °С;
- определение изгибной жесткости катетера при термоциклировании и построение графиков зависимостей изгибной жесткости катетеров от числа циклов их нагрева до температуры 130 ± 5 °С;
- определение изгибной жесткости катетера при температуре 37 ± 2 °С и построение графиков зависимостей изгибной жесткости катетеров от продолжительности их выдержки при этой температуре.

1. Результаты измерения размеров внутрисосудистых катетеров

Исследованиям были подвергнуты четыре группы внутрисосудистых катетеров, отобранных из разных партий:

- 10 диагностических внутрисосудистых катетеров Панорама 6F (группа 1);
- 7 диагностических внутрисосудистых катетеров Панорама 5F (группа 2);
- 10 проводниковых внутрисосудистых катетеров Аккорд 6F (группа 3);
- 4 проводниковых внутрисосудистых катетера Аккорд 6F (группа 4).

Внешний вид внутрисосудистых катетеров второй и четвертой группы показан на рис. 1.

Результаты измерения размеров внутрисосудистых катетеров приведены в табл. 1. Наружный и внутренний диаметры измерялись штангенциркулем с помощью специальных оправок. Размеры металлической оплетки определялись на инструментальном микроскопе.

Репрезентативная ячейка полимерно-металлического слоистого композиционного материала (RVE – representative volume element) показана на рис. 3,а. Определялись длины диагонали ромба, образованного осями проекций металлических волокон на плоскость композита. Образцы оплеток различных внутрисосудистых катетеров получены их выжиганием. Фотографии нескольких оплеток показаны на рис. 4.

Таблица 1

Геометрические характеристики внутрисосудистых катетеров

Наименование характеристики	Номер группы			
	1	2	3	4
1. Наружный диаметр d_n , мм	1,95	1,63	2,03	2,02
2. Внутренний диаметр $d_{вн}$, мм	1,61	1,35	1,61	1,61
3. Длина диагонали d_1 , мм	1,15	0,95	1,13	1,12
4. Длина диагонали d_2 , мм	0,6200	0,5200	0,5800	0,5800
5. Площадь поперечного сечения волокна S , мм ²	0,0040	0,0036	0,0051	0,0040
6. Стандартное отклонение наружного диаметра, мм	0,0279	0,0315	0,0246	0,0287
7. Стандартное отклонение внутреннего диаметра, мм	0,1072	0,0445	0,1072	0,1072
8. Коэффициент вариации наружного диаметра v_n	0,0143	0,0193	0,0121	0,0142
9. Коэффициент вариации внутреннего диаметра $v_{вн}$	0,0667	0,0330	0,0667	0,0667

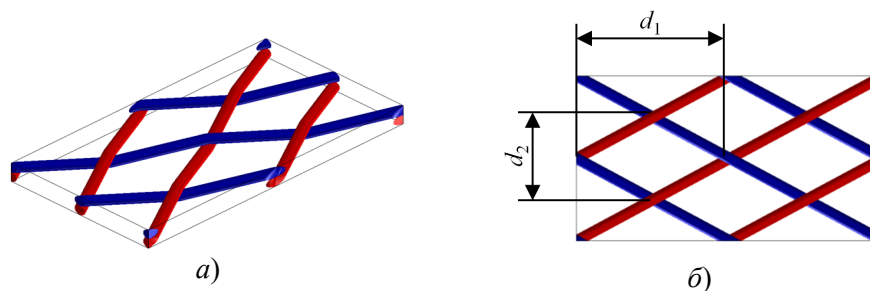


Рис. 3. Репрезентативная ячейка полимерно-металлического слоистого композиционного материала (матрица не показана):
а – внешний вид; б – характерные размеры

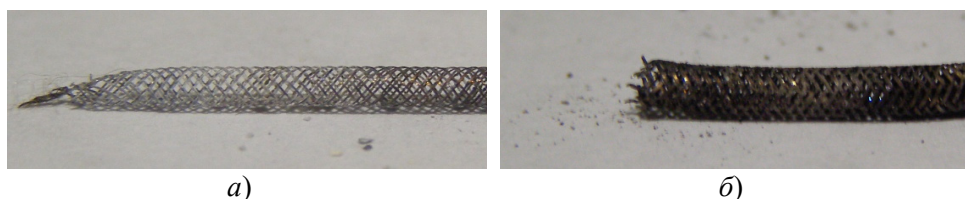


Рис. 4. Структура оплетки внутрисосудистых катетеров:
а – «Панорама» 6F; б – «Аккорд» 6F

2. Результаты определения изгибной жесткости внутрисосудистых катетеров

Определение изгибной жесткости внутрисосудистых катетеров при нормальной температуре осуществлялось с использованием методики и устройства, описание которых приведено в работе [1]. Статистические характеристики изгибной жесткости внутрисосудистых катетеров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изгибная жесткость внутрисосудистых катетеров

Наименование характеристики	Номер группы			
	1	2	3	4
1. Изгибная жесткость EJ , Н, мм ²	445,20	392,54	917,28	589,18
2. Стандартное отклонение изгибной жесткости, Н, мм ²	41,65	29,07	51,99	84,25
3. Коэффициент вариации изгибной жесткости	0,094	0,074	0,057	0,143

Определение зависимостей изгибной жесткости внутрисосудистых катетеров при повышенной температуре осуществлялось с использованием методики и устройства, описание которых приведено в работах [2, 3]. В качестве примера на рис. 5 приведены графики зависимостей прогиба катетеров от продолжительности выдержки при температуре 37 ± 2 °С. На каждом рисунке показаны графики зависимостей, определенные для двух значений изгибающих моментов.

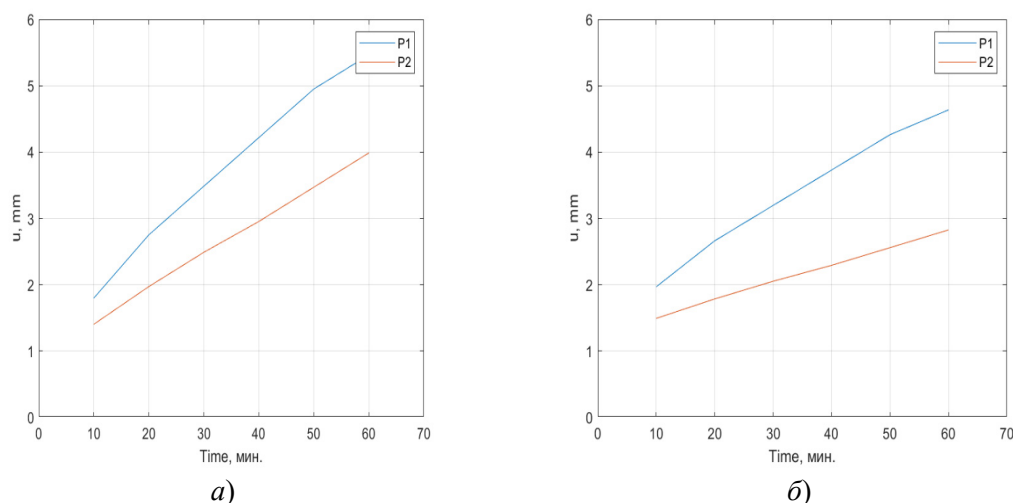


Рис. 5. Графики изменения прогиба катетеров от продолжительности выдержки при температуре 37 ± 2 °C:
 а – «Панорама» 6F; б – «Аккорд» 6F
 (P1 – изгибающий момент 3,25 Н·мм, изгибающий момент P2 – 2,69 Н·мм)

Проведенные испытания позволили определить диаграммы деформирования лабораторных образцов при статическом нагружении и графики зависимостей деформации от времени. В качестве примера на рис. 6,а показана диаграмма деформирования лабораторного образца при статическом нагружении. Графики зависимостей деформации лабораторного образца от времени при температуре 37 ± 2 °C и постоянных напряжениях 4,20 и 5,05 МПа показаны на рис. 6,б. График зависимости деформации лабораторного образца от времени при напряжении 5,05 МПа обозначен sig1, а при напряжении 4,20 МПа – sig2.

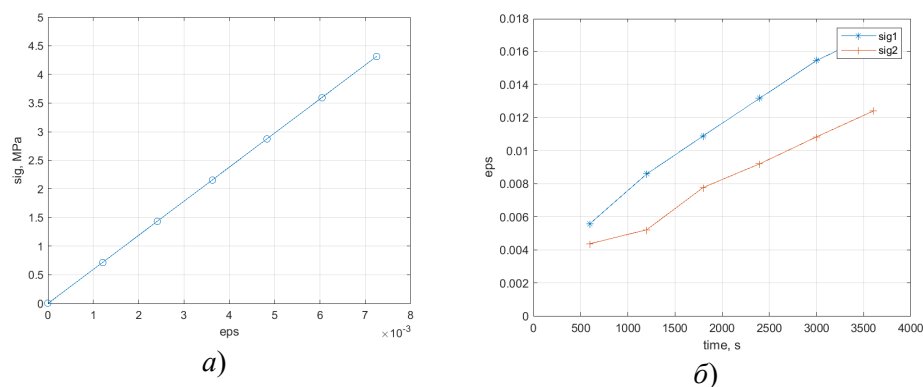


Рис. 6. Результаты испытаний лабораторных образцов:
 а – диаграмма деформирования лабораторного образца при статическом нагружении;
 б – графики зависимостей деформации от времени

Результаты испытаний лабораторных образцов использованы для идентификации параметров упругой и вязкоупругой моделей нейлона.

3. Об идентификации параметров моделей композита и его компонентов

Диаграмма деформирования лабораторного образца при статическом нагружении, показанная на рис. 6,а, использована для идентификации параметров упругой модели нейлона. При выполнении процедуры идентификации была использована программа Digimat-MX [4]. В результате выполнения процедуры идентификации получены следующие параметры упругой модели нейлона:

- модуль Юнга – 0,252 ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0,38.

Следует заметить, что используемые в качестве начальных параметры упругой модели нейлона, заимствованные из базы данных Digimat-MX, имели следующие значения:

- модуль Юнга – 0,29 ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0,37.

Графики зависимостей деформации лабораторного образца от времени при температуре $37 \pm 2^\circ\text{C}$, показанные на рис. 6,б, использованы для идентификации параметров вязкоупругой модели нейлона.

Для описания поведения нейлона использована модель линейной вязкоупругости, которая представляет собой следующую зависимость [4]:

$$\sigma(t) = G(t) : \varepsilon(0) + \int G(t-r) : \varepsilon^{(ve)}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\varepsilon(0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \varepsilon(t)$ – значения тензора деформации при $t = 0$; $\Delta t \rightarrow 0$; G – модуль сдвига;

$$G(t) = 2G_R(t)I^{dev} + K_R(t)I \otimes I.$$

Интегральное уравнение описывает эффект памяти материала. Это означает, что напряжение $\sigma(t)$ в момент времени $t > 0$ зависит от всей истории деформирования к этому моменту. $G_R(t)$ и $K_R(t)$ – модули релаксации, которые в изотропном случае представляют собой зависящие от времени модули сдвига и объемного сжатия соответственно. Все это приводит к представлению модуля сдвига $G_R(t)$ и модуля объемного сжатия $K_R(t)$, входящих в модель изотропной вязкоупругости, в виде ряда Прони:

$$G_R(t) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n w_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right], \quad G_0 = G(t=0), \quad (2)$$

$$K_R(t) = K_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n w_i^* \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i^*}} \right) \right], \quad K_0 = K(t=0). \quad (3)$$

Используемые в качестве начальных параметры вязкоупругой модели нейлона, заимствованные из базы данных Digimat-MX, имели следующие значения:

- время релаксации $t_1 = 1$ с, $t_2 = 10$ с, $t_3 = 100$ с;
- веса членов ряда Прони $w_1 = 0,24$, $w_2 = 0,5$, $w_3 = 0,26$.

В результате идентификации получены следующие значения параметров вязкоупругой модели нейлона:

- время релаксации $t_1 = 1$ с, $t_2 = 10$ с, $t_3 = 100$ с;
- веса членов ряда Прони $w_1 = 0,2$, $w_2 = 0,389$, $w_3 = 0,312$.

Результаты идентификации позволили определить инженерные константы композита. Значения инженерных констант получены в предположении об упругом поведении композита. При вычислении инженерных констант был использован метод Мори – Танака [4, 5]. Соответствующие значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Инженерные константы композита

Инженерная константа	Значение
Модуль продольной упругости E_1 , ГПа	29,9
Модуль продольной упругости E_2 , ГПа	9,1
Модуль продольной упругости E_3 , ГПа	3,75
Коэффициент Пуассона ν_{12}	0,31
Коэффициент Пуассона ν_{23}	0,066
Коэффициент Пуассона ν_{31}	0,478
Модуль сдвига в плоскости композита G_{12} , ГПа	34,0
Модуль сдвига вне плоскости композита G_{23} , ГПа	11,77
Модуль сдвига вне плоскости композита G_{31} , ГПа	10,88

4. Моделирование поведения материалов и конструкций

Расчет напряженно-деформированного состояния RVE выполнен методом спектральных элементов (FFT). Некоторые результаты расчета напряженно-деформированного состояния RVE приведены на рис. 7. Результаты расчетов получены для случая растяжения RVE вдоль оси X на 3 %.

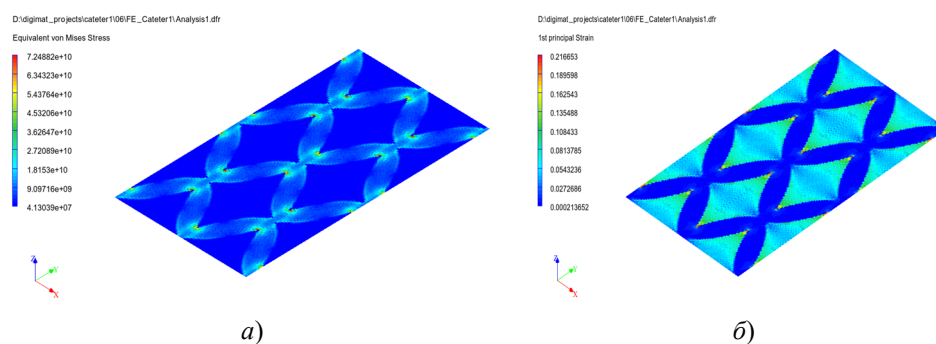


Рис. 7. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в RVE:
 а – распределения приведенных по Мизесу напряжений (дин/см²);
 б – распределения первых главных деформаций

Результаты сопоставления распределений позволяют сделать следующие выводы:

- напряжения в нитях армирующего больше, чем в матрице; в местах пересечения волокон армирующего наблюдается концентрация напряжений (рис. 7,а);

– первые главные деформации в матрице больше, чем в нитях армирующего; у пересечения волокон армирующего в матрице наблюдается концентрация деформаций (рис. 7,б).

Результаты компьютерного моделирования вязкоупругого деформационного поведения полимерно-металлического композита при одноосном деформировании приведены на рис. 8 и 9. При моделировании были использованы параметры модели вязкоупругости нейлона, полученные в результате идентификации.

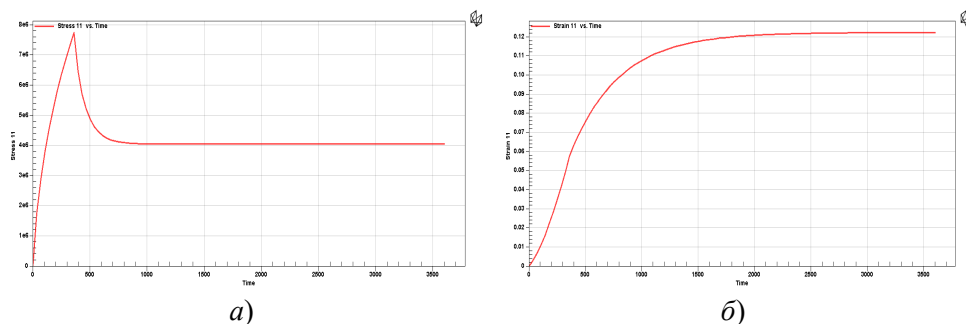


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования полимерных композитов при одноосном деформировании:
а – диаграмма релаксации; б – диаграмма ползучести

При построении диаграммы релаксации считалось, что жесткое нагружение осуществляется в два этапа. На первом этапе одноосная деформация возрастает от нуля до 3 %, на втором этапе поддерживается ее постоянное значение. Диаграмма релаксации показана на рис. 8,а. На диаграмме значения напряжений приведены в дин/см².

При построении диаграммы ползучести считалось, что мягкое нагружение осуществляется в два этапа. На первом этапе одноосное напряжение возрастает от нуля до 5 МПа, на втором этапе поддерживается его постоянное значение. Диаграмма ползучести показана на рис. 8,б.

Диаграмма деформирования при циклическом нагружении приведена на рис. 9.

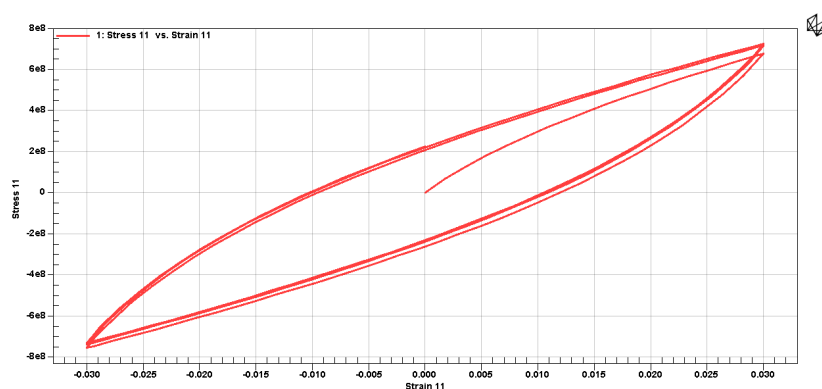


Рис. 9. Диаграмма деформирования при циклическом нагружении

При построении диаграммы нагружение считалось жестким с коэффициентом асимметрии цикла, равным -1 . Максимальная деформация в цикле равнялась 3% , скорость деформации $-1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. На диаграмме значения напряжений приведены в $\text{дин}/\text{см}^2$.

Результаты идентификации параметров моделей нейлона, вычисления инженерных констант всего композита были проверены путем сопоставления результатов расчетов напряженно-деформированного состояния лабораторного образца при четырехточечном изгибе с соответствующими результатами его испытаний.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния лабораторного образца при четырехточечном изгибе приведены на рис. 10. Результаты сопоставления распределений позволяют сделать следующие выводы:

– распределение модуля перемещений, представленное на рис. 10,а, свидетельствует о том, что прогиб образца составляет $6,26 \text{ мм}$, притом, что экспериментально определенное значение прогиба составляет $6,39 \text{ мм}$;

– распределения первых главных напряжений (рис. 10,б) и приведенных по Мизесу напряжений (рис. 10,в) показывают, что большая часть лабораторного образца находится в одинаковом напряженном состоянии, что подтверждает правильность выбора метода испытаний лабораторных образцов на четырехточечный изгиб;

– распределение первых главных макронапряжений (рис. 10,г) свидетельствует о возможности использования полученных в работе результатов для проведения двухуровневого моделирования полимерно-металлических слоистых композитов.

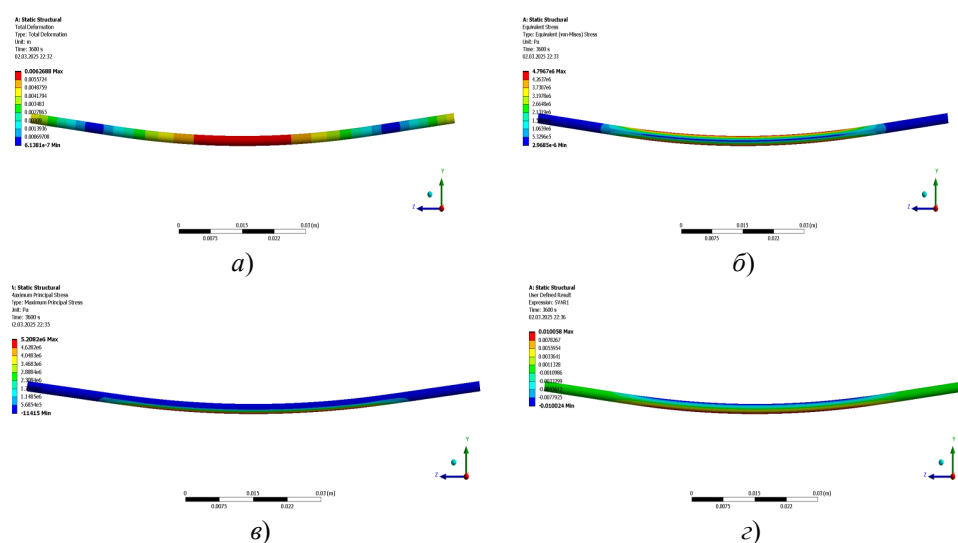


Рис. 10. Результаты расчета распределения:

а – модуля перемещений; б – первых главных напряжений;
в – приведенных по Мизесу напряжений; г – первых главных макронапряжений

Заключение

1. Изгибная жесткость внутрисосудистых катетеров существенно отличается у катетеров различных размеров и производителей. Максимальной

жесткостью обладают заготовки Аккорд 6F ($917,3 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$), минимальной – заготовки Панорама 5F ($392,5 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$). При сопоставлении изгибной жесткости следует учитывать тип и размер внутрисосудистых катетеров.

2. Результаты испытаний внутрисосудистых катетеров одинакового типа, размера и производителя позволили определить коэффициенты вариации изгибной жесткости. Так, коэффициент вариации заготовок Панорама 6F – 9,4 %, заготовок Панорама 5F – 7,4 %, заготовок Аккорд 6F (третья группа) – 5,7 %, заготовок Аккорд 6F (четвертая группа) – 14,3 %. Различия значений могут быть объяснены большим разбросом средних в малых выборках.

3. Сопоставление результатов испытаний позволяют сделать вывод о том, что испытанные заготовки Аккорд 6F нельзя считать принадлежащими одной генеральной совокупности.

4. В процессе выполнения работы определены конструкции и физико-механические свойства композиционных материалов диагностических и проводниковых внутрисосудистых катетеров четырех групп катетеров. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и производстве новых отечественных внутрисосудистых катетеров.

Список литературы

1. Тарханова А. Р., Муйземнек А. Ю. Исследование изгибной жесткости полимерных слоистых композиционных трубок при статическом нагружении // Актуальные проблемы науки и образования : сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. школы. Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. С. 161–164.
2. Тарханова А. Р., Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Вычисление изгибной жесткости полимерных слоистых композиционных трубок при испытаниях на изгиб // Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием / под ред. В. В. Салмина. Пенза : Пензен. гос. аграр. ун-т, 2025. С. 281–283.
3. Тарханова А. Р., Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Исследование влияние температуры на изгибную жесткость полимерных слоистых композиционных трубок // Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием / под ред. В. В. Салмина. Пенза : Пензен. гос. аграр. ун-т, 2025. С. 284–287.
4. Digimat 2023.1 MF User's Guide.
5. Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions // Acta Metallurgica. 1973. № 21. P. 571–574.

References

1. Tarkhanova A.R., Muiyemnek A.Yu. Investigation of the bending stiffness of polymer layered composite structures under static loading. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: sb. nauch. st. po materialam Mezhdunar. nauch.-prakt. shkoly* = *Actual problems of science and education : collection of scientific articles based on the materials of International scientific and practical school*. Penza: Izd-vo PGU, 2024:161–164. (In Russ.)
2. Tarkhanova A.R., Kartashova E.D., Muiyemnek A.Yu. Calculation of the bending stiffness of polymer layered composite structures during bending tests. *Sbornik statey XI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem* = *Collection of articles of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and students with international participation*. Penza: Penzen. gos. agrar. un-t, 2025:281–283. (In Russ.)

3. Tarkhanova A.R., Kartashova E.D., Muzyemnek A.Yu. Investigation of the effect of temperature on the bending stiffness of polymer layered composite tubes. *Sbornik statey XI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem* = *Collection of articles of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and students with international participation*. Penza: Penzen. gos. agrar. un-t, 2025:284–287. (In Russ.)
4. *Digmat 2023.1 MF User's Guide*.
5. Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*. 1973;(21):571–574.

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Дмитриевна Карташова

кандидат технических наук,
ассистент кафедры теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: katrina89@yandex.ru

Ekaterina D. Kartashova

Candidate of technical sciences,
assistant of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Муйземнек

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: muzyemnek@yandex.ru

Alexander Yu. Muzyemnek

Doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 21.05.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Н. Д. Печалин

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данного исследования определяется необходимостью совершенствования методов управления сложными проектами в оборонно-промышленном комплексе (ОПК) в условиях современных вызовов, включая геополитическую нестабильность, санкционное давление и ужесточение требований к выполнению государственного оборонного заказа. В сложившихся условиях традиционные подходы к принятию управленческих решений демонстрируют недостаточную эффективность, что обусловлено высокой степенью неопределенности и многокритериальным характером задач, стоящих перед предприятиями ОПК. Целью исследования является разработка научно обоснованной методики поддержки принятия решений для оптимизации управленческих процессов на всех этапах жизненного цикла создания образцов вооружения и военной техники. *Материалы и методы.* В основе предлагаемого подхода лежит интеграция методов многокритериального анализа и дискретной оптимизации в систему поддержки принятия решений (СППР), что обеспечивает комплексный учет технологических, ресурсных и временных ограничений, характерных для проектов ОПК. Особое внимание уделено разработке и применению метода полного перебора для задач с ограниченным множеством альтернатив. Используются методики анализа рисков FMEA, методы критического пути и визуализации проектных данных с помощью диаграмм Ганта. *Результаты.* Применение методики в СППР позволяет учитывать комплекс ограничений (ресурсных, временных, рискованных и производственных) для поиска оптимальных решений на различных этапах жизненного цикла создания образцов вооружений и военной техники. Метод полного перебора обеспечивает выбор наилучших корректирующих действий при жестких условиях, что подтверждается на примере этапа опытно-конструкторских работ, где использование взвешенных оценок и визуализации данных (диаграммы Ганта) позволило минимизировать отклонения от графика. Методика повышает обоснованность решений за счет формализации выбора, обеспечивает адаптивность к изменяющимся условиям и может быть интегрирована в существующие системы управления проектами в ОПК. *Выводы.* Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией методов искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозной аналитики в управлении проектами. Особый интерес представляет разработка адаптивных СППР, работающих в режиме реального времени и учитывающих изменяющиеся условия реализации проектов в ОПК.

Ключевые слова: управление проектами, оборонно-промышленный комплекс, многокритериальная оптимизация, принятие управленческих решений, методы анализа рисков, дискретная оптимизация

Для цитирования: Печалин Н. Д. Анализ проблематики повышения эффективности реализации проектной деятельности на предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 134–146. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-11

ANALYSIS OF THE ISSUES OF INCREASING THE EFFICIENCY OF PROJECT ACTIVITIES AT ENTERPRISES OF THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX

N.D. Pechalin

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

Abstract. *Background.* The relevance of this research is determined by the need to improve the methods of managing complex projects in the military-industrial complex in the face of modern challenges, including geopolitical instability, sanctions pressure and stricter requirements for the implementation of the state defense order. Under the current conditions, traditional approaches to managerial decision-making demonstrate insufficient effectiveness, due to the high degree of uncertainty and the multi-criteria nature of the tasks facing defense industry enterprises. The aim of the research is to develop a scientifically based decision support methodology for optimizing management processes at all stages of the life cycle of creating weapons and military equipment. *Matherials and methods.* The proposed approach is based on the integration of multicriteria analysis and discrete optimization methods into the decision support system (DSS), which provides comprehensive consideration of technological, resource and time constraints typical of defense industry projects. The methodological basis of the research consists of modern achievements in decision theory, including methods of multi-criteria optimization. Special attention is paid to the development and application of a discrete mathematical apparatus, in particular, the full search method for problems with a limited set of alternatives. The work also uses modern design techniques such as FMEA risk analysis, critical path methods and visualization of project data using Gantt charts. *Results.* The application of this approach in DSS makes it possible to take into account a set of constraints (resource, time, risk, and production) and find optimal management solutions at various stages of the life cycle of creating IWT samples. The full search method implemented within the framework of the DSS ensures the selection of the best corrective actions even under harsh conditions, which is confirmed by the example of the OCD stage, where the use of weighted estimates and data visualization (Gantt charts) allowed minimizing deviations from the schedule. The proposed methodology increases the validity of decision-making by formalizing the selection process, provides adaptability to changing conditions, and can be integrated into existing project management systems in the defense industry, contributing to their effectiveness. *Conclusions.* The prospects for further research are related to the integration of artificial intelligence and machine learning methods for predictive analytics in project management. Of particular interest is the development of adaptive decision support systems capable of working in real time and taking into account dynamically changing conditions for the implementation of projects in the military-industrial complex.

Keywords: project management, military-industrial complex, multi-criteria optimization, management decision-making, risk analysis methods, discrete optimization

For citation: Pechalin N.D. Analysis of the issues of increasing the efficiency of project activities at enterprises of the military-industrial complex. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):134–146. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-11

Введение

Современный этап глобального развития характеризуется беспрецедентным обострением международной конкуренции не только между транснациональными корпорациями, но и на уровне государств, стремящихся обеспечить национальную безопасность и экономическое лидерство. В ответ на эти вызовы государства активно задействуют широкий арсенал инструментов протекционистской и стимулирующей политики, включая (но не ограничиваясь) введение дифференцированных таможенных пошлин на импортную продукцию, предоставление целевых субсидий и налоговых льгот отечественным производителям, а также установление рестрикций и барьеров в стратегически важных секторах экономики. Подобная турбулентная и зачастую непредсказуемая среда предъявляет исключительно высокие требования к качеству и оперативности управленческих решений, принимаемых руководством предприятий ОПК. От лица, принимающего решение (ЛПР), сегодня требуются не просто гибкость и точность, но и способность к глубокому анализу, прогнозированию, разработке сценарных планов и принятию взвешенных решений в условиях дефицита времени и информации [1]. В этом контексте проектный менеджмент утвердился как ключевой инструмент, обладающий необходимым методологическим аппаратом и гибкостью для обеспечения эффективности в сложных условиях [2]. Постоянное развитие методологий и стандартов проектного управления, их адаптация к специфике ОПК делают этот подход наиболее востребованным и действенным способом администрирования предприятий отрасли перед лицом нарастающих внешних угроз и внутренних ограничений.

Таким образом, основная цель данного исследования заключается в разработке и обосновании методики выбора наиболее эффективного варианта проектного управления на каждом конкретном этапе процесса создания опытных образцов вооружения и военной техники (ВВТ) из множества потенциально применимых альтернатив. Достижение этой цели предполагает решение ряда задач, ключевой из которых является построение системы поддержки принятия решений (СППР) [3]. Этот алгоритм должен обеспечивать выбор оптимальных корректирующих управленческих воздействий (мер, решений) в заданный временной интервал (например, отчетный период, этап проекта), строго соответствующих критериям эффективности и результативности, которые были предварительно определены и утверждены ЛПР с учетом стратегических приоритетов и текущих ограничений предприятия.

Материалы и методы

Организация эффективной системы управления признается одной из наиболее фундаментальных и сложных задач для любого промышленного предприятия, особенно в высокотехнологичных и стратегически значимых отраслях, таких как оборонно-промышленный комплекс (ОПК). Наличие отлаженной, целостной и ориентированной на результат системы управления, способной комплексно решать задачи достижения стратегических целей

и тактических задач организации, является критическим фактором успеха. Такая система позволяет руководящему звену результативно распоряжаться всеми видами ресурсов – финансовыми, материальными, человеческими, информационными, технологическими – как внутренними, так и привлекаемыми извне. Это, в свою очередь, напрямую повышает общую управляемость предприятия, его финансовую рентабельность и, что крайне важно для ОПК, долгосрочную конкурентоспособность на внутреннем и международном рынках [4].

Информационные СППР стали неотъемлемой и высокоэффективной составляющей инструментария современного ЛПР. Эти системы трансформируют информацию из пассивных данных в активный стратегический ресурс, сопоставимый по значимости с материальными запасами и квалифицированными кадрами. Используя формализованные критерии и математические модели, СППР способны автоматизировать процесс анализа множества альтернатив и подбора оптимальных (или близких к оптимальным) вариантов управленческих решений для каждого конкретного этапа проекта или бизнес-процесса. Для ЛПР данные критерии служат четкими, измеримыми признаками, основаниями или правилами, на базе которых осуществляется оценка вариантов на соответствие предъявляемым требованиям (техническим, экономическим, временным, рисковым). Критерий эффективности управления предприятием ОПК, таким образом, является количественным или качественным индикатором, характеризующим уровень достижения поставленных целей управления. Информационная система, корректно учитывающая выбранные ЛПР критерии, становится мощным инструментом, способствующим достижению стратегических целей и выполнению тактических задач предприятиями ОПК через организацию оптимального взаимодействия между всеми участниками проекта (заказчик, головной исполнитель, соисполнители, поставщики) и рациональное распределение ресурсов [5].

В рамках данного исследования под эффективностью автор понимает степень достижения четко сформулированных целей проекта (или этапа) в установленный временной промежуток [6]. Это определение фокусируется на результативности (достижение цели) и экономии времени (соблюдение сроков). В традиционной управленческой практике доминируют экономические показатели эффективности, выраженные в виде соотношений (например, ROI – Return on Investment, прибыль/затраты). Однако для предприятий ОПК, деятельность которых зачастую регулируется государственным оборонным заказом (ГОЗ), характеризуется длительными циклами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), уникальностью продукции и высокими нефинансовыми рисками (включая риски национальной безопасности), исключительно экономические показатели являются недостаточными и даже могут вводить в заблуждение. Методика предлагает комплексную оценку эффективности вариантов управленческих решений для проекта по пяти ключевым критериям, отражающим специфику ОПК:

1. Стоимость: прямые и косвенные финансовые затраты на реализацию решения.
2. Длительность: время, необходимое для реализации решения и получения ожидаемого эффекта.
3. Риск: вероятность и потенциальное негативное влияние неудачи реализации решения или возникновения непредвиденных негативных последствий.

4. Финансовая устойчивость: влияние решения на финансовое положение инициатора (предприятия-исполнителя), его платежеспособность и стабильность.

5. Технологические ограничения: учет наличия необходимых технологий, компетенций, производственных мощностей, сертификаций, а также возможных патентных барьеров или санкционных ограничений на доступ к технологиям.

Данные специфические и сбалансированные показатели позволяют ЛПП получить многомерную картину последствий каждого варианта управления. Критерии могут применяться как изолированно (например, при жестком ограничении по бюджету главным будет критерий стоимости), так и в различных комбинациях с назначением весов, отражающих приоритеты текущего момента. Выбор из проанализированных вариантов становится обоснованным и нацеленным на максимальную эффективность конкретного проекта в конкретных условиях.

Результативность и устойчивость деятельности предприятия ОПК определяются не только производительностью труда основного производственного персонала, но и в огромной степени тем, насколько грамотно, рационально и адаптивно выстроена его организационная структура управления (ОСУ). Для проведения всесторонней оценки эффективности ОСУ предприятий ОПК предлагается применять следующий расширенный набор критериев [7]:

- сложность ОСУ и обоснованность иерархии: анализ количества уровней управления, нормы управляемости, дублирования функций, избыточности звеньев. Оценка необходимости и целесообразности существования каждого иерархического уровня;

- уровень цифровизации управленческих процессов: степень внедрения и реального использования современных цифровых технологий (ERP, MES, PLM, BI-аналитика, системы документооборота) в повседневной деятельности руководителей и специалистов управленческого аппарата;

- адаптивность и скорость реакции: способность системы управления оперативно выявлять возникающие риски (производственные, логистические, финансовые, кадровые) и принимать адекватные управленческие решения для их нейтрализации или минимизации последствий;

- стратегическая направленность: наличие и качество проработки не только общей стратегии развития предприятия, но и согласованных стратегических планов для каждого ключевого подразделения и уровня управления;

- экономичность управления: анализ затрат на содержание управленческого аппарата (фонд оплаты труда, административные расходы) и их соотношение с генерируемой прибылью или достигаемыми нефинансовыми результатами (выполнение государственного оборонного заказа в срок);

- контроль эффективности топ-менеджмента: наличие системы регулярного мониторинга и оценки деятельности руководителей высшего звена по четким KPI, связанным с итоговыми результатами предприятия;

- вклад управления в результат: оценка реального воздействия решений и действий управленческого аппарата на ключевые показатели эффективности предприятия (KPI) – выполнение планов производства, качество продукции, удовлетворенность заказчика, финансовые результаты;

– качество управленческих кадров: анализ численного состава руководящего звена, его квалификационного уровня, опыта, соответствия занимаемым должностям. Оценка соотношения численности управленцев к общей численности работников.

Для системного повышения эффективности управления в условиях санкций и турбулентности предприятию ОПК критически важно фокусироваться на следующих стратегических аспектах:

1. Диверсификация производства: расширение номенклатуры выпускаемой продукции и услуг, освоение смежных гражданских рынков (технологии двойного назначения). Это снижает зависимость от единственного заказчика или узкой продуктовой линейки.

2. Формирование новых источников дохода: поиск и развитие альтернативных, устойчивых каналов финансирования и прибыли (например, сервисное обслуживание, модернизация, экспорт в дружественные страны, НИОКР по гражданской тематике).

3. Оптимизация и снижение затрат: внедрение бережливого производства (Lean), поиск импортозамещающих решений, пересмотр логистических цепочек, автоматизация для повышения производительности.

Диверсификация выступает действенным механизмом хеджирования рисков. В ситуации, когда под влиянием внешних факторов (например, санкций) одно из направлений деятельности становится убыточным или блокируется, прибыль от других, устойчивых направлений позволяет предприятию сохранять финансовую стабильность и продолжать выполнение критически важных оборонных заказов [8].

Кроме того, необходимо сконцентрировать усилия на глубокой модернизации внутренней организации и процессов предприятия. В текущих условиях цифровизация бизнес-процессов перестает быть опцией и становится императивом выживания и роста. Предприятия ОПК могут и должны активно использовать цифровые технологии и продукты (интернет вещей (IoT), большие данные (Big Data), искусственный интеллект (AI), цифровые двойники) для коренной перестройки своих внутренних систем управления. Цель – достижение прозрачности процессов, снижение транзакционных издержек, устранение ручного труда и «бумажных» процедур, повышение скорости прохождения информации и принятия решений, что в совокупности ведет к значительному росту операционной эффективности [9].

Цифровые технологии открывают возможности не только для оптимизации, но и для создания принципиально новых или глубокой модернизации существующих продуктов ВВТ. Цифровизация становится ключом к сохранению и наращиванию масштабов деятельности ОПК в условиях ограничений. Бурное развитие информационных технологий предоставило в распоряжение предприятий новые мощные инструменты аналитики и моделирования данных. Это позволяет с гораздо большей точностью прогнозировать потенциальные риски (срывы поставок, технологические проблемы, колебания спроса) и разрабатывать упреждающие меры по их минимизации. Процесс цифровизации также стимулирует формирование новых высокотехнологичных рабочих мест и профессий (инженер по кибербезопасности, разработчик цифровых двойников), способствует развитию смежных отраслей (метавселенные для моделирования и обучения, «умные» производства, системы «умный город» для инфраструктурных решений ОПК), основанных на применении систем искусственного интеллекта и обработки больших данных [10].

Наконец, в фокусе внимания должны находиться кибербезопасность и цифровая этика. По мере роста зависимости от цифровых систем и данных угрозы в киберпространстве (кибератаки, утечки данных, саботаж) становятся существенными рисками, способными парализовать деятельность предприятия и нанести ущерб национальной безопасности. Вопросы этичного использования данных и технологий искусственного интеллекта также приобретают критическую важность. Эти аспекты напрямую влияют на устойчивость и эффективность процессов цифровизации и требуют вложения ресурсов и постоянного контроля.

Таким образом, к традиционным (классическим) критериям оценки эффективности управления предприятиями ОПК (финансовые показатели, выполнение плана производства) необходимо добавить и интегрировать в общую систему оценки новые, актуальные критерии, отражающие современные вызовы:

- уровень диверсификации производства и доходов. Измерение доли оборонной продукции/услуг, количества освоенных новых рынков, вклада гражданской продукции в общую выручку;
- глубина и зрелость внедрения цифровых технологий. Оценка охвата цифровыми решениями ключевых процессов (проектирование, производство, снабжение, управление), уровня интеграции систем, использования аналитики данных для принятия решений;
- уровень киберзащищенности и устойчивости. Оценка состояния защищенности информационных систем, инфраструктуры, данных; наличие и эффективность системы реагирования на инциденты; уровень осведомленности персонала; соответствие требованиям регуляторов.

Результаты и обсуждение

Для преодоления специфических вызовов проектной деятельности в ОПК и достижения декларируемой эффективности предлагается внедрение и использование следующих специализированных инструментов управления проектами:

1. Централизованный контроль сроков закупок. Обеспечение своевременного поступления всех необходимых комплектующих и материалов для производства образцов ВВТ в требуемом количестве и качестве, включая отслеживание статуса заказов у поставщиков и управление рисками срывов.
2. Сквозная синхронизация работ. Реализация механизмов для четкой координации и синхронизации производственных процессов по созданию образцов на всех уровнях кооперации (головное предприятие, соисполнители, субподрядчики) для устранения простоев и «бутылочных горлышек».
3. Дискретное согласование объемов и сроков. Внедрение процедур поэтапного согласования производственных заданий, объемов выпуска и календарных графиков между всеми предприятиями-участниками кооперации ОПК, обеспечивающее предсказуемость и обязательность исполнения.
4. Мониторинг резервных мощностей в реальном времени. Создание системы оперативного учета и визуализации наличия свободных производственных мощностей (станки, линии, испытательные стенды) на предприятиях кооперации для гибкого перераспределения задач в случае сбоев.

5. Проактивный мониторинг стадий производства. Организация непрерывного отслеживания прогресса по всем стадиям производства опытных образцов с целью раннего выявления потенциальных срывов сроков поставки готовых изделий и инициирования упреждающих корректирующих действий.

6. Оптимизация информационного обмена. Обеспечение эффективного, защищенного и стандартизированного обмена информацией (технической, производственной, управленческой) между всеми предприятиями и организациями, вовлеченными в проект, с использованием современных защищенных платформ.

7. Управление изменениями документации. Внедрение регламентированных процедур оперативного внесения, согласования и доведения до производства корректировок конструкторской и технологической документации, вызванных в ходе испытаний или по требованию заказчика.

8. Программа повышения надежности и качества. Реализация комплекса технических и организационных мероприятий (FMEA-анализ, доработки, усиленный контроль, внедрение новых материалов/технологий), направленных на повышение надежности, качества и общей эффективности создаваемых образцов ВВТ.

Механизмы практической реализации перечисленных инструментов определяются и поддерживаются научно-методическим аппаратом проектного управления. Этот аппарат должен учитывать комплекс ограничений:

- ресурсные ограничения. Ограниченность финансов, людских ресурсов, уникального оборудования;
- рискованные ограничения. Высокая неопределенность, технологические, политические, санкционные риски;
- корпоративные процедуры. Внутренние регламенты, стандарты, системы отчетности предприятий ОПК;
- требования импортонезависимости. Необходимость обеспечения критических компонентов и технологий отечественными аналогами или разработками;
- производственные мощности. Реальная доступность и состояние производственных фондов в условиях санкционного давления и необходимости диверсификации.

Задача оптимизации формулируется как максимизация интегральной оценки E при соблюдении следующих типовых ограничений:

1. Бюджетное ограничение. Суммарная стоимость выбранных вариантов не должна превышать доступный бюджет на корректирующие действия на данном этапе.

2. Временное ограничение. Суммарная длительность реализации выбранных вариантов не должна превышать допустимый временной резерв на данном этапе.

3. Ограничение по совокупному риску. Суммарная оценка риска выбранных вариантов не должна превышать приемлемый для ЛПР уровень риска на этапе.

4. Ограничения по ресурсам/зависимостям (опционально). Могут быть добавлены ограничения на использование специфических ресурсов (уникальные специалисты, оборудование) или логические ограничения, учитывающие взаимозависимость вариантов (например, вариант А может быть выбран, только если выбран вариант В).

Для решения сформулированной задачи дискретной оптимизации с бинарными переменными в условиях относительно небольшого числа альтернатив применяется метод полного перебора. Это наиболее простой в концептуальном плане, но и наиболее вычислительно затратный метод. Его суть заключается в последовательном рассмотрении всех возможных комбинаций включения/исключения вариантов. Для каждой возможной комбинации:

1. Проверяется выполнение всех заданных ограничений (бюджет, время, риск и др.).

2. Если ограничения выполняются, рассчитывается значение целевой функции (интегральной оценки эффективности E для данной комбинации).

3. Из всех комбинаций, удовлетворяющих ограничениям, выбирается та, для которой значение E максимально. Эта комбинация и является оптимальным набором корректирующих действий.

Несмотря на вычислительную сложность при большом n , для задач с десятком вариантов (как в практическом примере ниже) метод полного перебора реализуем даже на стандартных вычислительных средствах, он обеспечивает гарантированное нахождение глобального оптимума.

Рассмотрим этап выполнения опытно-конструкторской работы (ОКР) по изготовлению опытного образца изделия в течение 1-го квартала отведенного на весь ОКР срока. В ходе рабочего совещания с участием руководителей проекта, технологов и представителей ключевых подразделений сформулирован перечень возможных управленческих решений (вариантов корректирующих действий) для преодоления выявленных на данном этапе проблем и ускорения работ:

Шаг 1: Определение критериев и назначение весов. ЛПР, исходя из приоритетов этапа (например, жесткие сроки при умеренном бюджете), определяют следующие критерии и их весовые коэффициенты.

Шаг 2: Экспертная оценка альтернатив по критериям. Группа экспертов (руководители, ведущие инженеры, экономисты) оценивает каждую альтернативу по каждому критерию по шкале, например, от 1 до 10, где 10 означает наилучшее значение с точки зрения вклада в общую эффективность проекта.

Шаг 3: Расчет взвешенных оценок. Для каждой альтернативы рассчитывается взвешенная сумма баллов. Это значение показывает относительную привлекательность каждого варианта в отдельности.

Шаг 4: Выбор оптимального варианта. На основе рассчитанных взвешенных оценок становится видно, какая альтернатива имеет наивысшую интегральную оценку (это укажет на то, что решение, согласно выбранным критериям и их весам, является наиболее эффективным для реализации на данном конкретном этапе для ускорения изготовления опытного образца). Это выбор лучшего «одионого» действия или, если ресурсы позволяют, нескольких действий одновременно, необходимо решать задачу оптимизации с бинарными переменными на полном множестве актуальных альтернатив, как описано в математической модели.

Применение строгого проектного подхода к управлению задачами производства продукции ВВТ является не просто актуальным, но и объективно необходимым. Проекты создания ВВТ изначально характеризуются комплексом объективных жестких ограничений, среди которых доминируют:

1. Жесткие временные рамки. Сроки разработки и поставки часто диктуются требованиями национальной безопасности и не подлежат существенному пересмотру.

2. Ограниченность бюджетов. Финансирование ОКР и серийного производства строго регламентировано ГОЗ или экспортными контрактами.

3. Высокие требования к качеству и надежности. Не допускаются компромиссы в части характеристик продукции.

4. Сложная кооперация. Множество участников, географическая распределенность, необходимость синхронизации.

Проектное управление предоставляет структурированный методологический каркас для работы в этих условиях, оно позволяет четко определить и формализовать цель проекта, декомпозировать сложную задачу на управляемые этапы и подзадачи, назначить ответственных, спланировать ресурсы и, что критически важно, визуализировать весь план и прогресс его выполнения через инструменты вроде план-графика (диаграммы Ганта) [11].

На рис. 1 представлен пример визуального сравнения нескольких вариантов решений для конкретной подзадачи на этапе N проекта, демонстрирующий компромиссы между стоимостью реализации и временем выполнения. Эта наглядность существенно облегчает ЛПР процесс выбора.

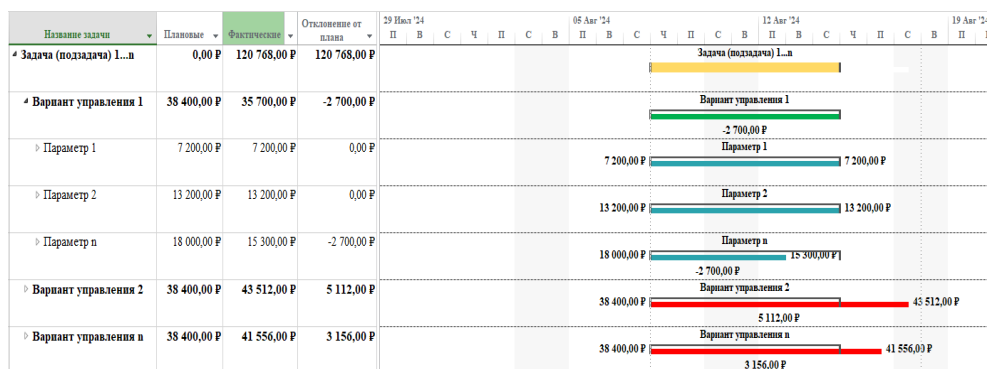


Рис. 1. Сравнение вариантов управления

На рис. 2 отражен реальный ход выполнения ОКР по созданию опытного образца, где на ключевых контрольных точках применялся описанный алгоритм выбора корректирующих действий. План-график наглядно показывает:

1. Исходный базовый план.
2. Возникновение отклонений.
3. Точки принятия решений (контрольные точки), где применялся алгоритм.

4. Внедренные корректирующие действия.

5. Фактический скорректированный график, демонстрирующий, как применение выбранных оптимальных решений позволило компенсировать задержки и выйти на плановые сроки завершения ОКР.

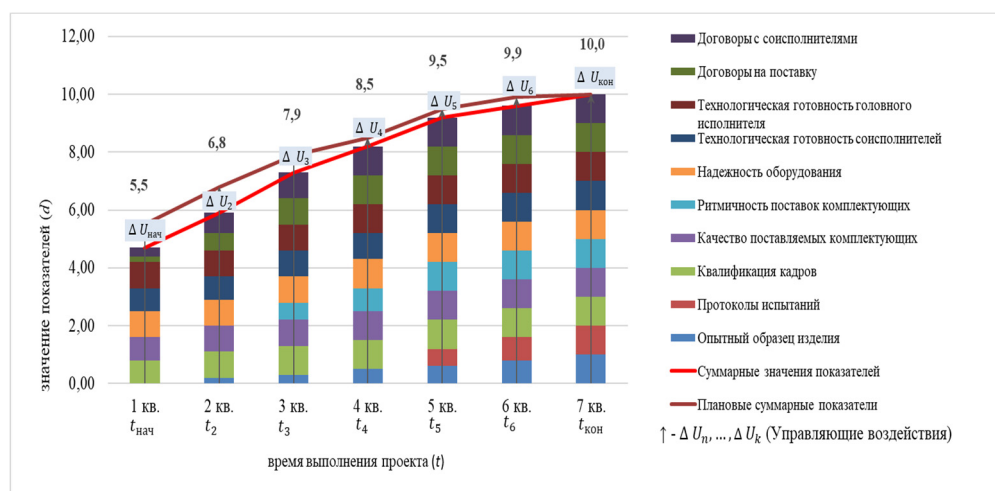


Рис. 2. Ход выполнения проекта

Заключение

Разработанная методика и алгоритм, интегрированные в СППР, обеспечивают объективный и прозрачный процесс выбора управленческих решений из множества альтернатив. ЛПР получает инструмент, позволяющий выбирать не просто «интуитивно правильные», а доказательно наиболее эффективные варианты управления на каждом этапе проекта, строго в соответствии с установленными приоритетами (критериями) и имеющимися ограничениями.

Использование план-графика (диаграммы Ганта) как инструмента визуализации предоставляет неоценимое преимущество. Он позволяет наглядно сравнивать различные варианты управленческих решений по ключевым параметрам, размеру требуемых финансовых затрат и влиянию на общую длительность выполнения задач проекта. Эта наглядность значительно упрощает коммуникацию между участниками проекта и обоснование выбора перед заказчиком и руководством.

Практическая апробация предложенной СППР на примере этапа ОКР показала ее высокую эффективность. Систематическое применение алгоритма выбора оптимальных корректирующих действий на всех критических этапах проекта позволяет своевременно выявлять и нивелировать возникающие отклонения от плана. Это является ключевым фактором для своевременного завершения проектов, изначально отстающих от плановых показателей, минимизации штрафных санкций и выполнения обязательств перед заказчиком в установленные сроки.

Предложенная СППР обладает высокой степенью адаптивности. Критерии оценки, их веса и само множество альтернатив могут гибко настраиваться под специфику конкретного проекта, этапа, доступных ресурсов и внешних условий. Это делает методику универсальным и практико-ориентированным инструментом для руководителей проектов в высокострессовой и регламентированной среде предприятий ОПК, способствуя повышению общей эффективности и управляемости проектной деятельности.

Внедрение предложенной СППР позволяет существенно повысить эффективность управления сложными проектами в ОПК, обеспечивая научную обоснованность решений при сохранении необходимой гибкости в условиях высокой неопределенности и жестких отраслевых требований.

Список литературы

1. Голяткина Л. И. Системы поддержки принятия решений: от Лейбница до искусственного интеллекта // Вестник Государственного университета «Дубна». Серия: Науки о человеке и обществе. 2023. № 1.
2. Куликов А. В. Адаптивный проектный менеджмент в меняющихся условиях рынка // Вестник науки. 2025. Т. 3, № 5 (86). С. 159–177.
3. Допира Р. В., Ягольников Д. В., Яночкин И. Е. Компонентный подход при проектировании образцов вооружения и военной техники // Военная мысль. 2023. № 1. С. 66–70.
4. Лекторович С. В. Стратегическое управление и планирование в современных организациях: ключевые аспекты и методы // Инновации и инвестиции. 2024. № 4. С. 176–179.
5. Доброва К. Б. Совершенствование стратегического планирования развития корпораций оборонно-промышленного комплекса России // МИР (Модернизация. Инновация. Развитие). 2016. Т. 7, № 2. С. 23–27.
6. Архиреев А. В. Генезис понятия эффективности. Структура, состояние, оценка // Контекст и рефлексия: философия о мире и человеке. 2023. Т. 12, № 10А. С. 36–49. doi: 10.34670/AR.2024.43.45.004
7. Лабабиди М. Р., Кельчевская Н. Р. Система поддержки принятия решений (СППР) как инструмент принятия эффективных управленческих решений на промышленных предприятиях // Сборник докладов Международной конференции студентов и молодых ученых (Екатеринбург, 21–23 апреля 2022 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2022. С. 377–381.
8. Маликова Д. М. Особенности организации производства в оборонно-промышленном комплексе Российской Федерации на современном этапе // Организатор производства. 2018. Т. 26, № 1.
9. Мовтян Б. А., Данилаев Д. П. Роль корпоративного центра в повышении эффективности выполнения гособоронзаказа предприятиями ОПК // Организатор производства. 2018. Т. 26, № 3.
10. Костин К. Б., Шимко П. Д., Сун Ци. Повышение эффективности управления доходами предприятий в Российской Федерации в современных условиях санкционных ограничений // Экономические отношения. 2022. Т. 12, № 4. С. 671–698.
11. Киямутдинова Д. Д., Баянова А. А., Киямутдинова Д. Д. [и др.] Диаграмма Ганта и ее актуальность // МЕРИДИАН. 2020. № 4 (38). С. 96–98.

References

1. Golyatkina L.I. Decision support systems: from Leibniz to artificial intelligence. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta «Dubna»*. Seriya: Nauki o cheloveke i obshchestve = *Bulletin of the Dubna State University. Series: Sciences of Man and Society*. 2023;(1). (In Russ.)
2. Kulikov A.V. Adaptive project management in changing market conditions. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2025;3(5):159–177. (In Russ.)
3. Dopira R.V., Yagol'nikov D.V., Yanochkin I.E. A component-based approach to the design of weapons and military equipment. *Voennaya mys' = Military thought*. 2023;(1):66–70. (In Russ.)

4. Lektorovich S.V. Strategic management and planning in modern organizations: key aspects and methods. *Innovatsii i investitsii = Innovation and investment*. 2024;(4):176–179. (In Russ.)
5. Dobrova K.B. Improving strategic planning for the development of corporations of the Russian defense industry. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsiya. Razvitie) = THE WORLD (Modernization. Innovation. Development)*. 2016;7(2):23–27. (In Russ.)
6. Arkhireev A.V. The genesis of the concept of efficiency. Structure, condition, evaluation. *Kontekst i refleksiya: filosofiya o mire i cheloveke = Context and reflection: Philosophy about the world and man*. 2023;12(10A):36–49. (In Russ.). doi: 10.34670/AR.2024.43.45.004
7. Lababidi M.R., Kel'chevskaya N.R. Decision Support System (DSS) as a tool for effective management decision-making at industrial enterprises. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh (Ekaterinburg, 21–23 aprelya 2022 g.) = Collection of reports of the International Conference of Students and Young Scientists (Yekaterinburg, April 21–23, 2022)*. Ekaterinburg: UrFU, 2022:377–381. (In Russ.)
8. Malikova D.M. Features of production organization in the defense-industrial complex of the Russian Federation at the present stage. *Organizator proizvodstva = Production Organizer*. 2018;26(1). (In Russ.)
9. Movtyan B.A., Danilaev D.P. The role of the corporate center in increasing the efficiency of state defense order fulfillment by defense industry enterprises. *Organizator proizvodstva = Organizer of production*. 2018;26(3). (In Russ.)
10. Kostin K.B., Shimko P.D., Sun Tsi. Improving the efficiency of corporate income management in the Russian Federation under the current conditions of sanctions restrictions. *Ekonomicheskie otnosheniya = Economic relations*. 2022;12(4):671–698. (In Russ.)
11. Kiyamutdinova D.D., Bayanova A.A., Kiyamutdinova D.D. et al. The Gantt chart and its relevance. *MERIDIAN*. 2020;(4):96–98. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Дмитриевич Печалин

аспирант,
ведущий инженер отдела
гражданской продукции,
Центральный научно-исследовательский
радиотехнический институт имени
академика А. И. Берга
(Россия, г. Москва, ул. Новая
Басманная, 20, стр. 9)
E-mail: npechalin@vk.com

Nikolay D. Pechalin

Postgraduate student,
senior engineer of the civil
products department,
Central Scientific Research Radio
Engineering Institute named after
Academician A.I. Berg
(9 build., 20 Novaya Basmannaya street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 25.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 16.06.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

АГРЕГИРОВАННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕТРИКИ ХАУСДОРФА

К. М. Демушкина

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
riabova.ksenija@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе рассматривается метод неинвазивной диагностики рака молочной железы с помощью диэлектрической импедансной спектроскопии. Предлагается способ формирования по результатам обследования методом диэлектрической импедансной спектроскопии агрегатированной оценки состояния молочной железы, которая повышает достоверность обнаружения новообразований. *Материалы и методы.* Для оценки результатов биоимпедансной спектроскопии был разработан следующий алгоритм: на основе результатов многократных измерений активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления молочной железы в информативном частотном диапазоне 20 Гц – 20 МГц рассчитываются статистические параметры и метрика Хаусдорфа частотных характеристик составляющих относительной диэлектрической проницаемости, которые нормируются методом MinMax. Агрегатированная оценка состояния молочной железы формируется из нормированных оценок статистических параметров и метрик Хаусдорфа методом PCA/LOO. *Результаты.* В результате исследования были ранжированы три объекта согласно объему неоднородных включений. Полученные результаты совпали с экспериментальными данными. *Выводы.* Применение статистических параметров и метрики Хаусдорфа позволяет провести сравнительную оценку объектов с неоднородными включениями и на основе агрегатированной оценки определить динамику развития раковой клетки.

Ключевые слова: статистические параметры, метрика Хаусдорфа, диэлектрическая импедансная спектроскопия, рак молочной железы

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по гранту Государственного задания (Рег. № 124020200015-7).

Для цитирования: Демушкина К. М. Агрегатированная оценка результатов диэлектрической импедансной спектроскопии на основе статистических параметров и метрики Хаусдорфа // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 147–155. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-12

AGGREGATED EVALUATION OF DIELECTRIC IMPEDANCE SPECTROSCOPY RESULTS BASED ON STATISTICAL PARAMETERS AND HAUSDORFF METRIC

K.M. Demushkina

Penza State University, Penza, Russia
riabova.ksenija@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper considers a method for the noninvasive diagnosis of breast cancer using dielectric impedance spectroscopy. A method is proposed for the formation of an aggregated assessment of the condition of the breast based on the results of an examination by dielectric impedance spectroscopy, which increases the reliability of the detection of neoplasms. *Materials and methods.* To evaluate the results of bioimpedance spectroscopy, the following algorithm was developed: based on the results of multiple measurements of the active and reactive components of the complex resistance of the mammary gland in the informative frequency range of 20 Hz – 20 MHz, statistical parameters and the Hausdorff metric of the frequency characteristics of the components of the relative permittivity are calculated, which are normalized by the MINIM method. The aggregated breast condition assessment is formed from normalized estimates of statistical parameters and Hausdorff metrics using the PCA/LOO method. *Results.* As a result of the study, three objects were ranked according to the volume of heterogeneous inclusions. The results obtained coincided with the experimental data. *Conclusions.* The use of statistical parameters and the Hausdorff metric allows for a comparative assessment of objects with heterogeneous inclusions, and based on an aggregated assessment, to determine the dynamics of cancer cell development.

Keywords: statistical parameters, Hausdorff metric, dielectric impedance spectroscopy, breast cancer

Financing: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the grant of the State Assignment (Reg. № 124020200015-7).

For citation: Demushkina K.M. Aggregated evaluation of dielectric impedance spectroscopy results based on statistical parameters and Hausdorff metric. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):147–155. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-12

Введение

В настоящее время рак молочной железы является самым распространенным видом рака у женщин. По данным сведений Росстата за 2022 г., 23,8 % приходится на рак молочной железы [1]. На сегодняшний день наиболее информативными способами диагностики патологии молочных желез являются контрастная мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ), позитронно-эмиссионная томография / компьютерная томография (ПЭТ/КТ) – это виды лучевой диагностики. За время лечения пациент проходит большое количество ПЭТ/КТ обследований, что негативно сказывается на состоянии организма. В связи с этим требуется разработка такого подхода, который бы обеспечивал постоянный мониторинг состояния пациента без воздействия рентгеновских лучей.

Таким методом может стать биоимпедансная спектроскопия (БИС) – диэлектрическая импедансная спектроскопия (ДИС). Метод ДИС исследует

различия параметров комплексного сопротивления здоровой и больной клеток [2]. Относительная диэлектрическая проницаемость раковых и здоровых клеток различна [3, 4], на этой основе строится анализ состояния пациента.

Материалы и методы

Биоимпедансная спектроскопия – это метод неинвазивного исследования, который исследует компоненты тела (вода, жир, мышцы), анализируя их электрические свойства. Она широко применяется во многих сферах медицины, позволяя расширять диагностические параметры с целью уточнения данных [5]. Основная идея применения данного метода к диагностике рака молочной железы состоит в следующем: применение датчика в форме сферы, исключая контакт электродов с кожей. Для проведения экспериментальных исследований будут использоваться фантомы и двухэлектродный датчик [6]. Основная задача ДИС состоит в исследовании кривых амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), которые сформированы из активной (R) и реактивной (X) составляющих относительной диэлектрической проницаемости. Исходные данные получены с помощью LCR-метра на частотах 20 Гц – 20 МГц. Таким образом, исходные данные для анализа представляют собой двумерный массив чисел с плавающей точкой: 200 отсчетов для компонента R и 200 отсчетов для компонента X , т.е. 400 элементов.

Для анализа результатов биоимпедансной спектроскопии используются общепринятые статистические параметры, а также метрика Хаусдорфа:

- MAE – средняя абсолютная ошибка;
- MAPE – средняя абсолютная ошибка в процентах;
- MSE – средняя квадратичная ошибка;
- RMSE – квадратный корень из среднеквадратичной ошибки;
- Метрика Хаусдорфа – расстояние между двумя подмножествами метрического пространства.

Для нормализации будет использован метод MinMax [7, 8], а для агрегации оценок – метод главных компонент (PCA) [9, 10] или LOO (Leave One Out) [11].

Укрупненная схема анализа кривых АЧХ представлена на рис. 1.

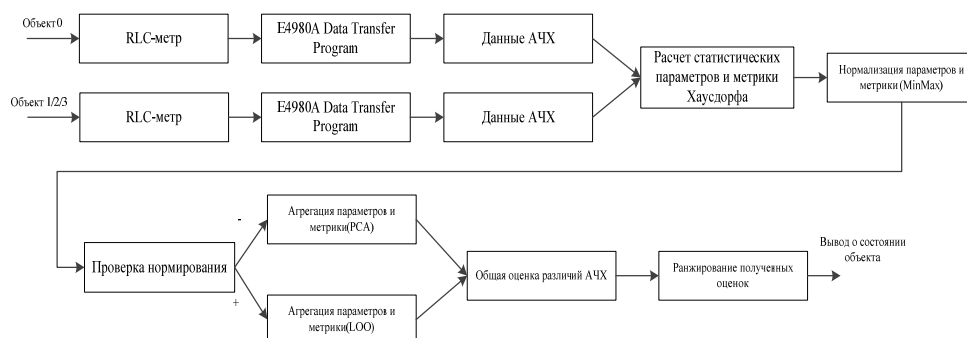


Рис. 1. Общая схема анализа статистических показателей ДИС

Для получения кривых АЧХ необходимо провести измерения с помощью аппаратно-программного комплекса, который представляет собой систему RLC-метра и программы E4980A для записи данных кривых АЧХ в Excel. Все исследуемые объекты сравниваются с контрольным объектом (объект 0), который представляет собой однородное тело. После этого с помощью

данных активного и реактивного сопротивлений относительной диэлектрической проницаемости рассчитываются статистические параметры и метрика Хаусдорфа для последующего определения состояния исследуемого объекта. Для нормирования статистических параметров и метрики Хаусдорфа используется метод MinMax. Если хотя бы один объект будет иметь по всем показателям оценку 0, то использовать метод PCA некорректно. Объект, имеющий по всем показателям оценку 0, будет считаться аномальным и при расчете главной компоненты будет иметь наихудшие значения. В данном случае лучше использовать агрегацию методом LOO. Затем в результате агрегации получается общая оценка состояния объекта на основе статистических параметров и метрики Хаусдорфа. Данная оценка позволит ранжировать объекты по возрастанию оценки, что соответствует возрастанию неоднородных включений в объект.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения статистических параметров для трех объектов, которые представляют собой фантомы с неоднородными включениями: объект 1 – включение 1 см³; объект 2 – включение 2 см³; объект 3 – включение 3 см³. Под неоднородным включением будем понимать объект с отличающейся от эталонного объекта диэлектрической проницаемостью. Расчеты будут проводиться для активного (R) и реактивного (X) сопротивления, а также их общего значения.

Таблица 1

Результаты расчета статистических параметров для R

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	8,472	212,845	210,033
MAE	229,333	3991,856	3930,687
RMSE	686,919	8478,198	8853,33
MSE	471 857,342	71 879 844,77	78 381 452,1
Hausdorff distance (manhattan)	5713,467	5748,433	63 479,833

По результатам расчета статистических параметров видно, что объект 1 по всем показателям лучше объектов 2 и 3. Однако разрозненность используемых параметров требует проведения нормализации для сведения имеющихся показателей к единым нормированным значениям.

С помощью метода MinMax была проведена процедура нормализации, результаты которой представлены в табл. 2.

По результатам нормирования получилось следующее: объект 1 по-прежнему остается лучшим. Важно отметить, что отклонение объекта 1 от объекта 2 по метрике Хаусдорфа незначительно, хотя остальные параметры показывают больший шаг. Ввиду того, что при нормализации некоторые параметры объектов могут отклоняться в большую или меньшую сторону, необходима агрегированная оценка всех имеющихся параметров.

Таблица 2

Результаты нормализации методом MinMax

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	0,000	0,000	0,986
MAE	0,000	1	0,984
RMSE	0,000	0,954	1
MSE	0,000	0,917	1
Hausdorff distance (manhattan)	0,000	0,0006	1

Оценка будет даваться с помощью двух методов; в случае если доля объясненной дисперсии методом главных компонент составит меньше 90 %, то будет применяться метод LOO.

Расчеты показали, что доля объясненной дисперсии составила 86 %, а значит, метод главных компонент (PCA1) не в полной мере отражает дисперсию исходных данных. Более того, один из объектов имеет по всем показателям оценку 0, что делает его аномальным по отношению к другим объектам.

Результаты расчета агрегированной оценки методом LOO представлены в табл. 3.

Таблица 3

Общие оценки объектов (LOO)

Исключенный объект	Оценки оставшихся объектов	Среднее	Оценка исключенного объекта
Объект 1	[0,774; 0,994]	0,884	0
Объект 2	[0; 0,994]	0,497	0,774
Объект 3	[0,0; 0,774]	0,387	0,994

Таким образом, оценка объекта 1 составила 0,0, что делает его идеальным в выборке. При его исключении оставшиеся объекты (0-2 и 0-3) получают высокие оценки (~0,77 и ~0,99). Объект 2 имеет оценку 0,774 – это делает его худшим вариантом по сравнению с объектом 1. При его исключении объект 0-1 сохраняет оценку 0,0, а объект 3 остается худшим с оценкой 0,994. Соответственно, объект 3 имеет оценку 0,994, а при его исключении остальные объекты сохраняют свои значения.

Результаты расчета статистических параметров для оценки реактивного сопротивления представлены в табл. 4.

По результатам расчета статистических параметров видно, что объект 1 по всем показателям лучше объектов 2 и 3, результаты нормирования представлены в табл. 5.

Результаты нормирования следующие: объект 1 – лучший; объект 2 – чуть лучше объекта 3; объект 3 – самый худший. Поскольку объект 1 по всем оценкам показал 0, а доля объясненной дисперсии составила 99 %, рекомендуется использовать метод агрегации LOO для того, чтобы объект 1 не представлял собой аномальные значения (табл. 6).

Таблица 4

Результаты расчета статистических параметров для X

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	7,701	207,864	224,973
MAE	1235,771	34 511,497	37 942,577
RMSE	1940,964	57 437,345	64 173,283
MSE	3 767 342,11	3 299 048 600,649	4 118 210 251
Hausdorff distance (manhattan)	10 213	349 213,333	392 643,333

Таблица 5

Результаты нормализации методом MinMax

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	0,000	0,921	1
MAE	0,000	0,907	1
RMSE	0,000	0,891	1
MSE	0,000	0,800	1
Hausdorff distance (manhattan)	0,000	0,886	1

Таблица 6

Общие оценки объектов (LOO)

Исключенный объект	Оценки оставшихся объектов	Среднее	Оценка исключенного объекта
Объект 1	[0,881; 1]	0,940	0
Объект 2	[0; 1]	0,5	0,881
Объект 3	[0,0; 0,881]	0,441	1

Оценка объекта 1 составила 0, поэтому данный объект считается лучшим решением. При исключении объекта 1 остальные объекты сохраняют свои значения. Объект 2 имеет оценку 0,881, что выше объекта 1. При исключении объекта 2 значения оставшихся сохраняются. Аналогичная ситуация с объектом 3, только его оценка равна 1, что делает его худшим объектом в выборке.

Полученные результаты позволяют утверждать, что применение агрегированной оценки статистических параметров и метрики Хаусдорфа допускает сравнение объектов с неоднородными включениями. Нормирование имеющихся параметров делает оценку более объективной за счет приведения к единой единице измерения и обобщенному диапазону значений. Агрегированная оценка предоставляет возможность объективно оценить удаленность исследуемых объектов от однородного объекта.

Тем не менее в рассмотренном экспериментальном исследовании объекты не могли быть агрегированы с помощью метода PCA, что обусловлено возможной аномалией объекта 1 при агрегации. В то же время метод LOO при обобщении использует среднеарифметическое всех оценок объекта, что тоже не является объективным в полной мере.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на поиск объективной оценки результатов биоимпедансометрии. Для этого могут быть использованы обученные нейросетевые модели или разработан алгоритм, включающий в себя известные способы нормирования и агрегации с учетом набора данных реактивной и активной составляющих относительной диэлектрической проницаемости.

Заключение

В результате исследования были получены статистические показатели и метрики Хаусдорфа для активной и реактивной составляющих диэлектрической проницаемости, их нормированные значения методом MinMax, а также агрегированная оценка по каждому объекту с помощью метода LOO. Полученные оценки показали, что объект 1 является наилучшим из имеющейся выборки неоднородных объектов, это позволяет утверждать, что его отклонение от однородного самое минимальное. Данный алгоритм позволяет оценить развитие раковой клетки в молочной железе, предоставляя врачам информацию о динамике заболевания. С перспективой развития персонализированной медицины пациенты смогут самостоятельно отслеживать изменения в раковой опухоли и своевременно реагировать на ухудшение ситуации.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 17.03.2025).
2. Jossinet J. The impedivity of freshly excised human breast tissue // *Physiol. Meas.* 1998. Vol. 19, № 1. P. 61–75.
3. Zarafshani A. Feasibility Test of Quantitative Assessment of Breast Density Based on Dielectric Impedance Spectroscopy // *JABB.* 2017. Vol. 2, № 6.
4. Grzegorzcyk T. M. [et al.]. Fast 3-D Tomographic Microwave Imaging for Breast Cancer Detection // *IEEE Trans. Med. Imaging.* 2012. Vol. 31, № 8. P. 1584–1592.
5. Safronov M. [et al.]. Mobile ECG Monitoring Device with Bioimpedance Measurement and Analysis // 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Moscow, 2019. P. 375–380. doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510118
6. Kuzmin A., Baranov V. Bioimpedance spectroscopy of breast phantoms // *Journal of Electrical Bioimpedance.* 2025. Vol. 16, № 1. P. 50–55. doi: 10.2478/joeb-2025-0007
7. Косякова Н. В. Оценка регионального здравоохранения методом Minmax с целью изучения опыта организации лекарственного обеспечения больных с орфанными заболеваниями // *Здоровье и образование в XXI веке.* 2017. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-regionalnogo-zdravoohraneniya-metodom-minmax-s-tselyu-izucheniya-opyta-organizatsii-lekarstvennogo-obespecheniya-bolnyh-s> (дата обращения: 09.06.2025).
8. Rodriguez A., Wright G., Emrich S., Clark P. L. MinMax: A versatile tool for calculating and comparing synonymous codon usage and its impact on protein folding // *Protein Sci.* 2018. № 27 (1). P. 356–362. doi: 10.1002/pro.3336

9. Haque Md. S. Hassan Md. R., Binmakhashen G. M. [et al.]. Breast Density Classification for Cancer Detection Using DCT-PCA Feature Extraction and Classifier Ensemble // *Intelligent Systems Design and Applications*. 2018. March. P. 702–711. doi: 10.1007/978-3-319-76348-4_68
10. Ibrahim S., Nazir S., Velastin S. Feature Selection Using Correlation Analysis and Principal Component Analysis for Accurate Breast Cancer Diagnosis // *Journal of Imaging*. 2021. Vol. 7. P. 225. doi: 10.3390/jimaging7110225
11. Yuan J., Li Y., Liu C., Zha X. Leave-One-Out Cross-Validation Based Model Selection for Manifold Regularization // *7th International Symposium on Neural Networks*. 2010. P. 457–464.

References

1. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki = Federal State Statistics Service*. (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 17.03.2025).
2. Jossinet J. The impedivity of freshly excised human breast tissue. *Physiol. Meas.* 1998;19(1):61–75.
3. Zarafshani A. Feasibility Test of Quantitative Assessment of Breast Density Based on Dielectric Impedance Spectroscopy. *JABB*. 2017;2(6).
4. Grzegorzczak T.M. et al. Fast 3-D Tomographic Microwave Imaging for Breast Cancer Detection. *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2012;31(8):1584–1592.
5. Safronov M. et al. Mobile ECG Monitoring Device with Bioimpedance Measurement and Analysis. *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. Moscow, 2019:375–380. doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510118
6. Kuzmin A., Baranov V. Bioimpedance spectroscopy of breast phantoms. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2025;16(1):50–55. doi: 10.2478/joeb-2025-0007
7. Kosyakova N.V. Assessment of regional healthcare using the Minmax method in order to study the experience of organizing drug provision for patients with orphan diseases. *Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke = Health and education in the 21st century*. 2017;(12). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-regionalnogo-zdravoohraneniya-metodom-minmax-s-tselyu-izucheniya-opyta-organizatsii-lekarstvennogo-obespecheniya-bolnyh-s> (accessed 09.06.2025).
8. Rodriguez A., Wright G., Emrich S., Clark P.L. MinMax: A versatile tool for calculating and comparing synonymous codon usage and its impact on protein folding. *Protein Sci.* 2018;(27):356–362. doi: 10.1002/pro.3336
9. Haque Md.S. Hassan Md.R., Binmakhashen G.M. et al. Breast Density Classification for Cancer Detection Using DCT-PCA Feature Extraction and Classifier Ensemble. *Intelligent Systems Design and Applications*. 2018;March:702–711. doi: 10.1007/978-3-319-76348-4_68
10. Ibrahim S., Nazir S., Velastin S. Feature Selection Using Correlation Analysis and Principal Component Analysis for Accurate Breast Cancer Diagnosis. *Journal of Imaging*. 2021;7:225. doi: 10.3390/jimaging7110225
11. Yuan J., Li Y., Liu C., Zha X. Leave-One-Out Cross-Validation Based Model Selection for Manifold Regularization. *7th International Symposium on Neural Networks*. 2010:457–464.

Информация об авторах / Information about the authors

Ксения Михайловна Демушкина
аспирант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: riabova.ksenija@yandex.ru

Kseniya M. Demushkina
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 02.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 03.06.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025

ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВАНИЙ ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ: ОТ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ АДАПТИВНЫМИ БАЛАНСАМИ

Н. Д. Печалин

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность исследования определяется растущим разрывом между долгосрочным характером разработки сложных радиотехнических систем и традиционными подходами к оперативному управлению. Особенно остро эта проблема проявляется в оборонно-промышленном комплексе, где жизненные циклы проектов достигают 3–5 лет, в то время как системы управления остаются ориентированными на краткосрочное годовое планирование. Это фундаментальное противоречие приводит к системным кризисам управляемости, снижая эффективность реализации стратегически важных проектов. Целью работы является создание концептуальной модели управления, способной преодолеть существующие ограничения за счет органичного сочетания современных управленческих методик и цифровых технологий. *Материалы и методы.* В ходе исследования применялся комплексный методологический подход, включающий историко-эволюционный анализ управленческих парадигм, системное изучение механизмов проектного управления, а также методы ситуационного анализа и сценарного моделирования. *Результаты.* Предложена концептуальная модель управления, основанная на синтезе ситуационного анализа и процессного подхода с учетом современных информационных технологий. В основе лежит динамическое взаимодействие трех ключевых компонентов: постоянного мониторинга изменяющихся условий, гибкого процесса принятия решений и технологической платформы поддержки управления. *Выводы.* Выводы исследования свидетельствуют о том, что переход к концепции «управления управлением» открывает новые возможности для предприятий ОПК, позволяя не только минимизировать существующие риски, но и создать устойчивые конкурентные преимущества.

Ключевые слова: управление проектом, система MRP, эволюция управления, механизм управления

Для цитирования: Печалин Н. Д. Трансформация методологических оснований проектного управления: от сетевого планирования к управлению адаптивными балансами // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 156–166. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-13

TRANSFORMATION OF THE METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF PROJECT MANAGEMENT: FROM NETWORK PLANNING TO ADAPTIVE BALANCE MANAGEMENT

N.D. Pechalin

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

Abstract. *Background.* The relevance of the research is determined by the growing gap between the long-term nature of the development of complex radio engineering systems and traditional approaches to operational management. This problem is particularly acute in the military-industrial complex, where project life cycles reach 3–5 years, while management systems remain focused on short-term annual planning. This fundamental contradiction leads to systemic crises of manageability, reducing the effectiveness of the implementation of strategically important projects. The aim of the work was to create an adaptive management model capable of overcoming existing limitations through an organic combination of modern management techniques and digital technologies. *Materials and methods.* In the course of the research, a comprehensive methodological approach was applied, including a historical and evolutionary analysis of management paradigms, a systematic study of project management mechanisms, as well as methods of situational analysis and scenario modeling. *Results.* A conceptual management model based on a synthesis of situational analysis and a process approach based on modern information technologies is proposed. It is based on the dynamic interaction of three key components: constant monitoring of changing conditions, a flexible decision-making process and a technological management support platform. *Conclusions.* The findings of the study indicate that the transition to the concept of "management management" opens up new opportunities for defense industry enterprises, allowing not only to minimize existing risks, but also to create sustainable competitive advantages.

Keywords: project management, MRP system, management evolution, management mechanism

For citation: Pechalin N.D. Transformation of the methodological foundations of project management: from network planning to adaptive balance management. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(2):156–166. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-13

Введение

В текущей деловой практике преобладают «механизмы управления», основанные на методологии проектного менеджмента. Данные механизмы в основном сфокусированы на формировании краткосрочных оперативных планов финансово-хозяйственной деятельности, где горизонт планирования обычно ограничен одним годом. В то же время реализация стандартных проектов по разработке сложных радиотехнических систем отличается жизненным циклом, достигающим 3–5 лет в зависимости от масштаба [1]. Противоречие между краткосрочностью оперативного планирования и долгосрочностью проектных циклов существенно затрудняет применение скользящего планирования.

Для разрешения данной проблемы современные исследования предлагают два подхода. Первый, традиционный, концентрируется на постфактум-анализе провалов проектов и оптимизации управленческих процессов. Второй, инновационный, направлен на институционализацию проектного менеджмента как самостоятельной научной дисциплины. Уточнение концепта «механизм управления» требует систематизации признаков его эволюции, поскольку прогресс в теории управления неотделим от восприятия мира как непрерывного эволюционного потока.

Сущность эволюции заключается в усложнении структур от простых элементов к целостным системам высшего порядка, обладающим новыми свойствами. Интеграция компонентов в функциональные единства формирует основу саморегуляции и саморазвития в биологических, социальных и технических системах. В этом контексте механизм управления возникает как функциональная система. Применяя эволюционную парадигму к управленческим техникам, можно выявить их развитие через рефлекссию исторических пластов, отражающих доминирующие парадигмы своего времени. Например, современное сценарное управление возникло как развитие ситуационного управления, которое само является производным от проектного подхода. Модель прямого директивного управления, известная как «счетная игра» и сложившаяся во второй половине XIX в., столкнулась с непреодолимыми проблемами уже в годы Первой мировой войны – феноменом, получившим название «кризис аналитичности». Суть кризиса состояла в том, что противоборствующие стороны достигли сопоставимого уровня аналитической подготовки и единообразия мышления. Как следствие, любое управленческое действие становилось предсказуемым и неизменно встречало адекватный, заранее просчитанный ответ оппонента. Пространство возможных директивных решений, прежде относительно свободное, превратилось в «плотную среду», активно противодействующую изменениям и блокирующую эффективные управляющие воздействия.

Преодоление этого кризиса потребовало создания принципиально иного механизма – механизма управления над полем всех возможных решений (фактически управления управлением или балансами директив). Такой механизм, способный интегрировать разнородные деятельности в единую целевую рамку, был назван проектным управлением [2]. Каждый проект предполагал разработку организационного решения (оргпроекта) с последующим возвратом к оперативному директивному управлению на завершающей стадии. На протяжении первой половины XX в. наблюдалась устойчивая тенденция к укрупнению проектов, достигшая пика к середине столетия с появлением мегапроектов. Однако их растущие масштабы и сложность сделали мегапроекты трудноуправляемыми. Исторически их реализация часто становилась возможной лишь благодаря исключительным харизматичным лидерам (таким как С. Королев, В. фон Браун, И. Курчатов, Л. Якокка, Г. Форд, У. Гейте). Опыт доказал, что институты и проектные структуры, чрезмерно зависящие от гениальности руководителей, крайне уязвимы при смене лидерства. Сегодня мировая практика испытывает острый дефицит специалистов, готовых брать на себя ответственность за мегапроекты.

Параллельно к концу XX в. проектное пространство перенасытилось «обломками» проваленных мегапроектов, а также множеством текущих и требующих утилизации инициатив. Эта плотная среда обрела системные

свойства и начала активно сопротивляться изменениям, «кризису аналитичности» наследовал «кризис проектности». Его суть в том, что любой проект изначально задумывается как ответ на актуальные вызовы, т.е. глубоко интегрирован в текущий контекст. Поскольку реализация требует значительного времени, результаты попадают в уже изменившуюся реальность, что может исказить ожидаемые эффекты или полностью обесценить их.

Ситуационное управление предоставляет решение кризиса проектности посредством апробированного эволюционного механизма – рефлексивного перехода на более высокий уровень абстракции. Данный подход предполагает формирование механизма управления над пространством возможных проектных решений (управление проектностью или проектными балансами). Этот механизм способен интегрировать как реализуемые, так и потенциальные проекты (существующие в альтернативных сценариях) в единую целевую систему координат [3].

Материалы и методы

Концептуальная модель ситуационного анализа для управления развитием сложных технических систем требует методического обеспечения, включающего [4]:

1. Идентификацию факторов. Выявление ключевых переменных, определяющих динамику управленческой ситуации и ее трансформацию.
2. Оценку рисков и распознавание. Определение вероятности возникновения проблемных ситуаций при текущей динамике изменений и их оперативная диагностика.

Синтез управленческих действий для предотвращения или преодоления кризисных ситуаций на основе аналогий или разработки специализированных сценариев управления.

Ключевой методологической проблемой является наиболее сложный и наименее разработанный этап идентификации релевантных ситуационных факторов. Их выявление (часто методами компонентного анализа) требует обработки статистических данных о состоянии объектов, вовлеченных в развитие сложной системы или влияющих на него, с целью выделения доминирующих факторов, определяющих динамику ситуации в конкретный временной срез [5].

Принципы ситуационного управления:

1. Опорная траектория как базовая точка отсчета:
 - определяет параметры оптимального сбалансированного плана управления;
 - служит основой для оценки отклонений реальных/прогнозируемых показателей с последующей коррекцией;
 - аналогична концепции опорной гиперплоскости в математическом программировании.
2. Функции опорной траектории:
 - измерение величины отклонений;
 - расчет компенсирующих мероприятий («демпфирующих воздействий»);
 - анализ альтернативных управленческих действий.
3. Предельные значения отклонений:
 - определяют границы эффективности компенсации;
 - превышение пороговых значений требует перехода на новую траекторию развития.

Прогнозирование отклонений требует учета факторов неопределенности и анализа динамики управляемых процессов [6]. Современные рыночные требования (снижение себестоимости, повышение качества, гибкость реагирования) стимулировали развитие процессно-ориентированного подхода.

Базовые концепты процессного управления:

1. Бизнес-процесс: устойчивый набор взаимосвязанных операций, преобразующих входы (ресурсы) в выходы (продукт/услугу) для создания добавленной стоимости [7].

2. Цикл управления процессами:

- проектирование/оптимизация (инжиниринг, KPI);
- внедрение;
- учет и контроль;
- анализ отклонений;
- принятие решений по улучшению.

Дифференциация подходов в эволюционном контексте представлена в табл. 1.

Таблица 1

Дифференциация подходов

Проектный подход	Процессно-ориентированный подход
Создание оргпроекта → Возврат к оперативному управлению	Разработка организационного сценария → Возврат в проектное пространство
Ключевое действие: проектирование (упаковка решений)	Ключевое действие: сценирование (интеграция проектов/процессов)

Специфика сценирования:

1. Рефлексивная техника для условий неопределенности / дефицита ресурсов.

2. Отсутствие полной аналогии с проектированием.

3. Ключевая компетенция: оперирование вариантами будущего через построение непротиворечивых сценариев.

4. Включает продвинутые формы управления (например, дизайн виртуальных реальностей).

Дизайн виртуальных реальностей представляет собой современный инструмент для решения задач оптимального управления, направленного на достижение рациональных целей. Эффективность такого управления в первую очередь зависит от качества используемой информационной базы – ее объективности, достоверности и полноты. Многочисленные исследования развития передовых экономических систем подтверждают возрастающую роль информации, которая не только частично замещает традиционные ресурсы, но и способствует развитию инновационных технологий создания новых материалов.

Между информацией и управлением существует глубокая взаимосвязь [8]. С одной стороны, управленческие процессы невозможны без информационного обеспечения, с другой – сам информационный поток закономерно порождает управленческие механизмы. Любой управленческий цикл, будь то принятие решений или контроль их исполнения, начинается со сбора и обработки релевантных данных.

По своей сути, управление является фундаментальной функцией любых организованных систем – биологических, социальных или технических. Оно выполняет три ключевые задачи: сохраняет качественную определенность системы, поддерживает ее динамическое равновесие с окружающей средой и обеспечивает поступательное развитие. Управленческие механизмы представляют собой системную реакцию на информационные взаимодействия, формируя оптимальное поведение, состояние и траекторию развития системы в соответствии с накопленным опытом и актуальными потребностями.

Историческое развитие компьютерных систем управления прошло несколько этапов [9]. В 1950-е гг. основное внимание уделялось физическому управлению данными и техническим аспектам их хранения. 1960-е гг. ознаменовались появлением первых автоматизированных систем для решения конкретных задач учета и расчетов. К середине 1970-х гг. сформировался подход к информации как к стратегическому ресурсу, что привело к развитию систем управления базами данных. В 1990-е гг. акцент сместился на управление знаниями (KM), включая работу с неявными знаниями организации.

Современные информационные системы управления можно разделить на несколько основных классов [10]. CRM-системы ориентированы на управление взаимоотношениями с клиентами. ERP-решения обеспечивают комплексное управление ресурсами предприятия. PLM-системы охватывают весь жизненный цикл изделий, а SCM-решения оптимизируют цепочки поставок. Отдельно стоит отметить HRM-системы для управления персоналом и KM-системы для работы с корпоративными знаниями.

Особое место среди этих решений занимают ERP-системы как наиболее сложные и комплексные. Их эволюция началась в 1960-е гг. с методологии MRP (планирование потребности в материалах), разработанной Джозефом Орлики и Оливером Уайтом. При активной поддержке Американской ассоциации по управлению производственными запасами (APICS) эта методология стала отраслевым стандартом, объединив существующие подходы к производственному планированию.

Система MRP (планирование потребностей в материалах) строится вокруг трех ключевых элементов: объектов материального учета, спецификации материалов и основного производственного плана. Объектом учета выступают любые материальные ресурсы – от сырья до готовой продукции. Спецификация материалов представляет собой иерархическую структуру компонентов и технологию сборки изделия, тогда как основной производственный план определяет график выпуска продукции в соответствии с планом продаж.

Функционирование MRP основано на анализе текущих запасов, спецификаций и производственного плана для расчета потребностей в материалах и формирования соответствующих заказов. Хотя использование страховых запасов позволяет компенсировать небольшие сбои, классическая система MRP имеет существенное ограничение – она учитывает только материальные ресурсы, игнорируя другие критически важные факторы производства, такие как мощности, трудовые ресурсы и финансы.

Эволюция систем MRP привела к появлению концепции замкнутого цикла (Closed Loop MRP), которая обеспечивает обратную связь и контроль выполнения планов. Дальнейшее развитие включало внедрение функций анализа узких мест, моделирования производственных процессов и, что особенно важно,

планирования производственных мощностей. Эти усовершенствования позволили не только определять объемы и сроки производства, но и оценивать возможность их реализации на имеющихся мощностях, что ознаменовало переход к системам MRP II.

MRP II представляет собой качественно новый этап, где планирование охватывает все ключевые производственные ресурсы. Такие системы интегрируют различные аспекты управления – от планирования продаж и операций до управления производством, закупками и финансами. Их главное преимущество заключается в глубокой взаимосвязи модулей, создающей синергетический эффект и повышающей адаптивность системы.

Логическим продолжением этой эволюции стало появление ERP-систем, которые расширили сферу планирования на все ресурсы предприятия. Современные ERP-решения вышли далеко за первоначальные рамки, охватывая практически все аспекты деятельности компании [11]. Однако для управления инновационными проектами, характеризующимися высокой степенью неопределенности, требуются специализированные подходы. Это подчеркивает важность развития проектного менеджмента как самостоятельной дисциплины, которая, будучи частью прикладного системного анализа, предоставляет методологический инструментарий для решения сложных управленческих задач в условиях динамично меняющейся среды.

Результаты и обсуждение

На основе проведенного исследования автор предлагает концептуальную модель управления, основанную на синтезе ситуационного анализа и процессного подхода с учетом современных информационных технологий. В основе лежит динамическое взаимодействие трех ключевых компонентов: постоянного мониторинга изменяющихся условий, гибкого процесса принятия решений и технологической платформы поддержки управления.

Модель предполагает непрерывное отслеживание состояния системы через идентификацию значимых факторов и оценку рисков. Особое внимание уделяется разработке опорных траекторий развития, которые служат базой для измерения отклонений и выработки корректирующих воздействий. При этом подчеркивается важность определения предельных значений отклонений, за которыми требуется принципиальное изменение стратегии.

Процессная составляющая модели обеспечивает устойчивость управления через циклическую организацию деятельности: от проектирования решений до их реализации, контроля и последующего анализа. В отличие от классического проектного подхода, акцент делается на непрерывность совершенствования и способность адаптироваться к изменяющимся условиям.

Сценарные методы играют особую роль в условиях высокой неопределенности, позволяя рассматривать альтернативные варианты развития ситуации. Автор вводит концепцию «дизайна виртуальных реальностей» как современного инструмента моделирования управленческих решений, подчеркивая возрастающую роль информации как ключевого ресурса управления.

Технологической основой предлагаемого подхода выступает эволюционирующая система информационной поддержки, учитывающая как исторический

опыт развития управленческих технологий (от MRP к ERP), так и специфические требования к управлению инновационными проектами. Особое значение придается интеграции различных аспектов управления – от операционного до стратегического уровня.

Критически анализируя ограничения традиционных систем управления, автор обосновывает необходимость нового синтетического подхода, сочетающего адаптивность ситуационного анализа, устойчивость процессного управления, гибкость сценарных методов и технологические возможности современных информационных систем. Такой комплексный подход особенно востребован при управлении развитием сложных технических систем в условиях динамичной среды и ресурсных ограничений.

Анализ современных тенденций в управлении сложными проектами оборонно-промышленного комплекса с позиций информационных технологий выявляет существенный разрыв между традиционными подходами к управлению и современными требованиями к обработке данных. Длительные жизненные циклы разработки сложных технических систем, измеряемые годами, вступают в противоречие с ограниченными возможностями существующих информационных систем в области долгосрочного прогнозирования и анализа больших массивов данных. Это приводит к системным кризисам в аналитической обработке информации и принятии управленческих решений, когда стандартные программные решения оказываются неспособными эффективно работать в условиях высокой неопределенности и сложных взаимосвязей между параллельно выполняемыми проектами.

Решение данной проблемы требует принципиально нового подхода к построению информационных систем управления, основанного на глубокой интеграции современных компьютерных технологий. Необходимы системы, способные не только обрабатывать оперативные данные, но и моделировать долгосрочные сценарии развития проектов, анализировать сложные взаимосвязи между различными аспектами деятельности предприятия, а также адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. Особое значение приобретают технологии искусственного интеллекта, позволяющие автоматизировать процессы принятия решений на основе анализа больших объемов структурированных и неструктурированных данных.

Ключевым аспектом становится создание единого информационного пространства, объединяющего все этапы жизненного цикла продукции – от проектирования до производства и эксплуатации. Такие системы должны обеспечивать не только сбор и хранение данных, но и их семантическую обработку, выявление скрытых закономерностей и прогнозирование возможных проблемных ситуаций. При этом особое внимание должно уделяться вопросам информационной безопасности и устойчивости работы в условиях возможных внешних ограничений и санкций.

Развитие подобных интеллектуальных систем управления требует серьезной научно-исследовательской работы в области компьютерных наук, включая разработку новых алгоритмов обработки данных, методов машинного обучения и технологий распределенных вычислений. Только комплексный подход, сочетающий передовые достижения информатики с глубоким пониманием специфики оборонной промышленности, позволит создать действительно эффективные инструменты управления сложными проектами в условиях современной реальности.

Заключение

Перспективы развития управленческих систем в оборонно-промышленном комплексе с точки зрения информатики и вычислительной техники предполагают переход к интеллектуальным платформам нового поколения. Эти системы должны обладать способностью не просто обрабатывать отдельные управленческие задачи, но и моделировать комплексные сценарии управления с применением современных компьютерных технологий.

Основные направления развития включают внедрение методов искусственного интеллекта для проактивного моделирования кризисных ситуаций. Речь идет об использовании агентного моделирования, цифровых двойников и мультиагентных систем, позволяющих анализировать сложные взаимосвязи между различными аспектами управления. Особое значение приобретают технологии машинного обучения для адаптивной корректировки стратегий в реальном времени.

В области систем поддержки принятия решений акцент делается на интеграцию когнитивных технологий. Это предполагает разработку семантических онтологий для формализации предметной области, применение графовых баз данных для отображения сложных структур взаимосвязей, а также создание гибридных интеллектуальных систем, сочетающих различные подходы искусственного интеллекта.

Цифровая трансформация управленческих процессов требует создания специализированных вычислительных платформ. Ключевыми элементами становятся системы автоматического преобразования данных в управляющие воздействия, адаптивные интерфейсы для работы с альтернативными сценариями, а также распределенные вычислительные системы для обработки больших объемов стратегической информации.

Такой подход, основанный на современных достижениях информатики и вычислительной техники, позволяет преодолеть существующий разрыв между оперативным управлением и стратегическим планированием. Развитие интеллектуальных систем поддержки принятия решений становится критически важным фактором для обеспечения конкурентоспособности предприятий оборонно-промышленного комплекса в условиях цифровой трансформации.

Список литературы

1. Ларюхин В. Б., Овчинников С. А., Скобелев П. О., Шпилевой В. Ф. Управление процессами и ресурсами в системе полного жизненного цикла вооружения и военной техники на основе цифровой экосистемы адаптивного менеджмента // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10, № 3. С. 1259–1274. doi: 10.18334/vines.10.3.110620
2. Наугольнова И. А. История становления и перспективы развития процессного управления организацией // Лидерство и менеджмент. 2023. Т. 10, № 1. С. 53–64. doi: 10.18334/lim.10.1.117082
3. Антонов В. В., Конев К. А. Интеллектуальный метод поддержки принятия решений в типовой ситуации // Онтология проектирования. 2021. Т. 11, № 1 (39). С. 126–136. doi: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136
4. Антонов В. В., Конев К. А. Усовершенствование ситуационной методологии разработки систем поддержки принятия решений для предприятий // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 4 (46). С. 547–561. doi: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-547-561

5. Демин Г. А. Управленческие решения : учеб. пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2020. 92 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/demin-upravlencheskie-resheniya.pdf> (дата обращения: 20.05.2025).
6. Подгорная А. И., Сафина Д. М., Габдуллин Н. М. Прогнозирование финансового состояния предприятия: теория и практика : учеб. пособие. Казань : Казан. ун-т, 2024. 115 с.
7. Зыкова А. В., Денисов Д. Ю. Развитие концепции процессного управления // Проблемы экономики и юридической практики. 2024. Т. 20, № 5. С. 279–283. doi: 10.33693/2541-8025-2024-20-5-279-283 EDN: VSVUUE
8. Никитина Н. В., Скачков Д. Ю., Колупаев А. С. Трансформация проектно-процессного управления промышленными предприятиями в условиях цифровой среды // Креативная экономика. 2023. Т. 17, № 11. С. 4101–4112. doi: 10.18334/ce.17.11.119506
9. Хасанова А. Р., Иремадзе Э. О. История развития современных информационных технологий // Вопросы студенческой науки. 2021. № 3 (55).
10. Вологжанин О. Ю., Ильин В. В., Немов Я. Н. Информационные системы в управлении : учеб. пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2021. 292 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/vologzhanin-ilin-nemov-informacionnye-sistemy-v-upravlenii.pdf> (дата обращения: 20.05.2025).
11. Шитова Т. Ф. ERP-система – эффективный инструмент развития цифровой экономики // Вопросы студенческой науки. 2021. № 2. С. 27–39. doi: 10.22394/2304-3385-2021-2-27-39

References

1. Laryukhin V.B., Ovchinnikov S.A., Skobelev P.O., Shpilevoy V.F. Process and resource management in the system of the full life cycle of weapons and military equipment based on the digital ecosystem of adaptive management. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Issues of innovative economy*. 2020;10(3):1259–1274. (In Russ.). doi: 10.18334/vinec.10.3.110620
2. Naugol'nova I.A. The history of formation and prospects of development of the process management of the organization. *Liderstvo i menedzhment = Leadership and management*. 2023;10(1):53–64. (In Russ.). doi: 10.18334/lim.10.1.117082
3. Antonov V.V., Konev K.A. An intelligent decision support method in a typical situation. *Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology*. 2021;11(1):126–136. (In Russ.). doi: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136
4. Antonov V.V., Konev K.A. Improvement of the situational methodology for the development of decision support systems for enterprises. *Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology*. 2022;12(4):547–561. (In Russ.). doi: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-547-561
5. Demin G.A. *Upravlencheskie resheniya: ucheb. posobie = Management decisions : a study guide*. Perm, 2020:92. (In Russ.). Available at: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/demin-upravlencheskie-resheniya.pdf> (accessed 20.05.2025).
6. Podgornaya A.I., Safina D.M., Gabdullin N.M. *Prognozirovanie finansovogo sostoyaniya predpriyatiya: teoriya i praktika: ucheb. posobie = Forecasting the financial condition of an enterprise: theory and practice : a study guide*. Kazan: Kazan. un-t, 2024:115. (In Russ.)
7. Zyкова A.V., Denisov D.Yu. Development of the process management concept. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoy praktiki = Problems of economics and legal practice*. 2024;20(5):279–283. (In Russ.). doi: 10.33693/2541-8025-2024-20-5-279-283

8. Nikitina N.V., Skachkov D.Yu., Kolupaev A.C. Transformation of design and process management of industrial enterprises in a digital environment. *Kreativnaya ekonomika = Creative economy*. 2023;17(11):4101–4112. (In Russ.). doi: 10.18334/se.17.11.119506
9. Khasanova A.R., Iremadze E.O. The history of modern information technology development. *Voprosy studentcheskoy nauki = Student science issues*. 2021;(3). (In Russ.)
10. Vologzhanin O.Yu., Il'in V.V., Nemov Ya.N. *Informatsionnye sistemy v upravlenii: ucheb. posobie = Information systems in management : studies. stipend.* Perm, 2021:292. (In Russ.). Available at: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/vologzhanin-ilin-nemov-informacionnye-sistemy-v-upravlenii.pdf> (accessed 20.05.2025).
11. Shitova T.F. ERP system is an effective tool for the development of the digital economy. *Voprosy studentcheskoy nauki = Student science issues*. 2021;(2):27–39. (In Russ.). doi: 10.22394/2304-3385-2021-2-27-39

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Дмитриевич Печалин

аспирант,
ведущий инженер отдела
гражданской продукции,
Центральный научно-исследовательский
радиотехнический институт имени
академика А. И. Берга
(Россия, г. Москва, ул. Новая
Басманная, 20, стр. 9)
E-mail: npechalin@vk.com

Nikolay D. Pechalin

Postgraduate student,
senior engineer of the civil
products department,
Central Scientific Research Radio
Engineering Institute named after
Academician A.I. Berg
(9 build., 20 Novaya Basmannaya street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 25.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 16.06.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025