

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (55)

2025

СОДЕРЖАНИЕ

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

<i>Гамидуллаева Л. А., Рослякова Н. А., Васин С. М.</i> УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОНОМИКИ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ К КРИЗИСНОМУ ШОКУ: ОТРАСЛЕВОЙ ПОДХОД	5
<i>Малахова Ю. В., Бадеева Е. А., Булдыгин Д. А.</i> РОЛЬ БИРЖЕВЫХ ТОРГОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЗРАЧНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ОТРАСЛЕВОГО ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ	22
<i>Володин В. М., Володина Н. В., Рожкова Л. В., Питайкина И. А.</i> О НЕКОТОРЫХ ФОРМАХ ВЛИЯНИЯ НА КРИЗИСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭКОНОМИКЕ РЕГИОНОВ.....	34
<i>Скобелев Д. О., Попов А. Ю., Ганявин В. А., Костылева В. М., Малявин А. С.</i> ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ПРЕДИКТИВНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	46
<i>Чернецова Н. С.</i> КОНФЛИКТ МЕЖДУНАРОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНТЕРЕСОВ.....	65

Шифрин И. О., Долотин А. И., Суровицкая Г. В. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ	78
---	----

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Иванов М. А. РАЗДЕЛЕНИЕ ОЧЕРЕДЕЙ КАК МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ РАСПИСАНИЯ МНОГОСТАНОЧНОГО ЦЕХА РАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА СО СБОРОЧНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ	89
Иващенко А. В., Машков К. К. ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО РЕСУРСА	102
Кривоногов Л. Ю., Иномбоев И. С., Чебан Ю. П. НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ COVID-19 ПНЕВМОНИИ	113
Сеченов П. А., Рыбенко И. А. СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ МЕТОДА НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА И МЕТОДА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ С-О.....	127
Зиненко А. В. КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ	141
Лавров Р. О., Чащин И. В., Иваню А. Ю., Иваню А. В. СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.....	153
Адамова А. В., Буданов К. М., Кузьмин А. В. АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И ВАРИАТИВНОСТИ СИГНАЛОВ ЭКГ В НОРМЕ И С ПРИЗНАКАМИ АРИТМИИ	167

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

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3 (55)

2025

CONTENT

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

<i>Gamidullaeva L.A., Roslyakova N.A., Vasin S.M.</i> RESILIENCE OF THE ECONOMY OF RUSSIAN REGIONS TO CRISIS SHOCK: INDUSTRY APPROACH	5
<i>Malakhova Yu.V., Badeeva E.A., Buldygin D.A.</i> THE ROLE OF EXCHANGE TRADING IN ENSURING TRANSPARENCY OF INDUSTRY PRICING MECHANISMS	22
<i>Volodin V.M., Volodina N.V., Rozhkova L.V., Pitaikina I.A.</i> SOME FORMS OF INFLUENCE ON CRISIS PROCESSES IN REGIONAL ECONOMIES	34
<i>Skobelev D.O., Popov A.Yu., Ganyavin V.A., Kostyleva V.M., Malyavin A.S.</i> APPROACHES TO CREATING EMISSION FORECASTING SYSTEMS FOR MODERN INDUSTRIAL PROCESSES	46
<i>Chernetsova N.S.</i> CONFLICT OF INTERNATIONAL MECHANISMS FOR IMPLEMENTING NATIONAL ECONOMIC INTERESTS	65

<i>Shifrin I.O., Dolotin A.I., Surovitskaya G.V.</i> A MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE PROJECTS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY	78
---	----

SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

<i>Ivanov M.A.</i> QUEUE SEPARATION AS A METHOD OF OPTIMIZATION OF ANT COLONY ALGORITHM FOR MULTI-MACHINE ASSEMBLY JOB SHOP SCHEDULING	89
<i>Ivaschenko A.V., Mashkov K.K.</i> MAINTENANCE AND REPAIR OF MEDICAL EQUIPMENT IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES	102
<i>Krивonogov L.Yu., Inomboev I.S., Cheban Yu.P.</i> NEURAL NETWORK CLASSIFIER OF CHEST X-RAY IMAGES FOR DETECTING SIGNS OF COVID-19 PNEUMONIA	113
<i>Sechenov P.A., Rybenko I.A.</i> COMPARISON OF SOFTWARE IMPLEMENTATIONS OF THE METHOD OF UNCERTAIN LAGRANGE MULTIPLIERS AND THE METHOD OF PENALTY FUNCTIONS IN SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING THE EQUILIBRIUM COMPOSITION USING THE EXAMPLE OF THE C-O SYSTEM	127
<i>Zinenko A.V.</i> COMPREHENSIVE METHODOLOGY OF SUPPORTING INVESTMENT DECISIONS.....	141
<i>Lavrov R.O., Chashchin I.V., Ivanyu A.Yu., Ivanyu A.V.</i> THE METHOD OF STATISTICAL EVALUATION ERRORS IN OPTICAL AND GEOMETRIC DATA FOR INFORMATION PROCESSING AND ANALYSIS SPACE ASSETS	153
<i>Adamova A.V., Budanov K.M., Kuzmin A.V.</i> ANALYSIS OF STATISTICAL INDICATORS OF HEART RATE VARIABILITY AND ECG SIGNAL VARIABILITY NORMALLY AND WITH SIGNS OF ARRHYTHMIA	167

Раздел 1 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Section 1 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 332.12, 338.12
doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-1

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОНОМИКИ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ К КРИЗИСНОМУ ШОКУ: ОТРАСЛЕВОЙ ПОДХОД

Л. А. Гамидуллаева¹, Н. А. Рослякова²,
С. М. Васин³

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

²Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова
Российской академии наук, Москва, Россия

¹gamidullaeva@gmail.com, ²na@roslyakova24.ru, ³pspu-met@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В 2020 г. регионы РФ по-разному реагировали на внешние шоки ввиду наличия специфических отраслевых эффектов пандемии COVID-19. Исследование факторов устойчивого развития региональных экономик продолжает находиться в фокусе исследовательского интереса. Предметом данной работы является обоснование отраслевых детерминант, которые способны значимо определять устойчивость российских регионов к пандемическому шоку 2020 г. Гипотеза исследования: на основе анализа отраслевой динамики в сочетании с динамикой валового регионального продукта (ВРП) возможно определение направлений повышения устойчивости региональных социально-экономических систем. *Материалы и методы.* Были использованы общенаучные методы анализа и синтеза, сравнения и обобщения информации, компаративный, монографический, а также специальные методы экономико-статистических исследований (группировка, корреляционно-регрессионный анализ). *Результаты.* В результате исследования сделан вывод о том, что шоки, имевшие место в 2020 г., негативно сказываются на отраслях, связанных с качеством жизни и человеческим капиталом. *Выводы.* В качестве рекомендаций предложено реализовать системные трансформационные изменения в экономике российских регионов с целью изменения характера взаимосвязи между этими отраслями и динамикой ВРП в долгосрочном горизонте. Целесообразны также институциональные воздействия, которые в краткосрочном горизонте должны купировать негативные тенденции.

Ключевые слова: отраслевая динамика, кризисный шок, резилиентность, устойчивость, экономический рост

© Гамидуллаева Л. А., Рослякова Н. А., Васин С. М., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-28-01976 (URL: <https://rscf.ru/project/22-28-01976/>).

Для цитирования: Гамидуллаева Л. А., Рослякова Н. А., Васин С. М. Устойчивость экономики российских регионов к кризисному шоку: отраслевой подход // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 5–21. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-1

RESILIENCE OF THE ECONOMY OF RUSSIAN REGIONS TO CRISIS SHOCK: INDUSTRY APPROACH

L.A. Gamidullaeva¹, N.A. Roslyakova², S.M. Vasin³

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

²V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹gamidullaeva@gmail.com, ²na@roslyakova24.ru, ³pspu-met@mail.ru

Abstract. *Background.* In 2020, Russian regions responded differently to external shocks due to the specific industry-specific effects of the COVID-19 pandemic. The study of factors of sustainable development of regional economies continues to be the focus of research interest. The subject of this work is the substantiation of industry determinants that can significantly determine the resistance of Russian regions to the 2020 pandemic shock. Research hypothesis: based on the analysis of industry dynamics in combination with the dynamics of GRP, it is possible to determine directions for increasing the sustainability of regional socio-economic systems. *Materials and methods.* General scientific methods of analysis and synthesis, comparison and generalization of information, comparative, monographic, as well as special methods of economic and statistical research (grouping, correlation and regression analysis) were used. *Results.* The study concluded that the shocks that took place in 2020 have a negative impact on industries related to quality of life and human capital. *Conclusions.* As recommendations, it is proposed to implement systemic transformational changes in the economy of Russian regions in order to change the nature of the relationship between these industries and the dynamics of GRP in the long term. Institutional influences are also advisable, which should stop negative trends in the short term.

Keywords: industry dynamics, crisis shock, resilience, stability, economic growth

Financing: this research was supported by the Russian Science Foundation, grant number 22-28-01976 (URL: <https://rscf.ru/project/22-28-01976/>).

For citation: Gamidullaeva L.A., Roslyakova N.A., Vasin S.M. Resilience of the economy of Russian regions to crisis shock: industry approach. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):5–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-1

Введение

Шоковые события в период пандемии COVID-19 асимметрично проявились как в отдельных регионах, так и в разрезе различных отраслей экономики. Этот аспект до сих пор вызывает исследовательский интерес с позиции выявления лежащих в его основе причинно-следственных связей.

Как правило, следствием пандемии часто становятся изменение структуры экономики, формирование в регионе новых производств и ликвидация существующих [1]. Экономическая динамика российских регионов в 2020 г.

оказалась под сильнейшим давлением различных факторов, и пандемийный внешний шок как лакмусовая бумага наглядно продемонстрировал некоторые закономерности в плане реакции тех или иных отраслей, которые требуют дальнейшего углубленного изучения.

Аналогично другим экономикам мира в России отмечалась существенная неравномерность отраслевой динамики в 2020 г. Например, туризм (деятельность турагентств) по итогам 2020 г. показал наиболее глубокое из всех отраслей экономики падение валовой добавленной стоимости (ВДС) (–54,6 %), фармацевтическая отрасль, напротив, оказалась на пике своего роста (+22,2 %). Позитивная динамика НДС также сохранилась в химической промышленности (6,2 %) и IT-отрасли (3,4 %), в автомобилестроении – 13 %, отрасль добычи полезных ископаемых пострадала на 6,9 %, розничная торговля – на 4,1 %. В сельском хозяйстве, обрабатывающей промышленности, строительстве и торговле наблюдался незначительный рост. В розничной торговле (кроме торговли автотранспортными средствами) НДС снизилась на 6,3 % [2]. Существенно пострадала отрасль нефтедобычи по причине резкого снижения цен на нефть и газ и сокращения их продаж на мировом рынке [3].

Так в целом на отраслевой динамике сказался коронакризис. Однако в зависимости от отраслевой структуры и сложившейся социально-экономической ситуации регионы по-разному реагировали на внешние шоки ввиду наличия специфических отраслевых эффектов пандемии.

Целью работы является выявление закономерностей структурных сдвигов в отраслевом разрезе экономики регионов в условиях воздействия внезапных шоковых факторов на примере пандемии COVID-19.

Обзор литературы

Исследование факторов устойчивого или резилиентного¹ развития региональных экономик продолжает находиться в фокусе исследовательского интереса. Термин «устойчивость» не стоит путать с концепцией устойчивого развития (sustainable development), предполагающей сбалансированное триединство экономических, социальных и экологических целей развития [4]. В этом контексте речь идет о повышении прежде всего экологической эффективности региональных экономических субъектов на основе внедрения инноваций и ресурсосберегающих технологий.

Категория «устойчивость» трактуется авторами как способность системы вернуться в исходное состояние после окончания воздействия внешнего шока [5]. Здесь термин «устойчивость» становится синонимичным понятию «резилиентность», которое мы также будем использовать далее. Некоторые исследователи трактуют устойчивость как бесконечный эволюционный процесс,

¹ Термин «resilience» используется преимущественно в зарубежных публикациях. Однако в последнее время часто встречается и в отечественных. См., например: Климанов В. В., Казакова С. М., Михайлова А. А. Региональная резилиентность: теоретические основы постановки вопроса // Экономическая политика. 2018. Т. 13, № 6. С. 164–187. doi: 10.18288/1994-5124-2018-6-164-187 ; Чернова О. А., Тургель И. Д., Усольцева А. А. Библиометрический анализ научно-исследовательских трендов в тематическом кластере «региональная резилиентность» // Весенние дни науки : сб. докладов. Екатеринбург, 2022. С. 303–309 ; Акбердина В. В. Факторы резильентности в российской экономике: сравнительный анализ за период 2000–2020 гг. // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2021. Т. 17, № 8. С. 1412–1432. doi: 10.24891/ni.17.8.1412

определяемый способностью рыночных, политических и других институтов не только выдерживать флуктуации, но и адаптироваться к ним и переходить на новую качественную траекторию экономического роста [6–10]. Однако стоит отметить, что такой подход справедлив не только для институтов, но и для социально-экономических систем в целом. При этом для систем разного уровня (федерального, регионального или местного уровня) можно выделить свой набор характеристик, который будет описывать устойчивость.

Существуют различные концептуальные подходы к пониманию региональной резилиентности. Одним из них является подход, который ориентирован на зависимость от предшествующего пути развития (институциональное развитие, инновационная активность, предпринимательская среда, отраслевая структура экономики и др.). Основными факторами региональной резилиентности в соответствии с данным подходом являются диверсификация экономики, благоприятная институциональная среда, а также государственное регулирование [11–13].

В качестве детерминант экономической резильентности регионов ученые определяют разнообразные параметры: фактор агломерации и урбанизации [14, 15], финансовую систему [16–18], отраслевую структуру, включая уровень диверсификации экономики [7, 13, 19–22] и «связанное разнообразие» отраслевой структуры [23–25]; качество госуправления [26–29]; мобильность рабочей силы и экономико-географическое положение региона [30]; факторы, связанные с потребительским спросом и характером потребительских предпочтений на разных этапах развития экономических циклов [31].

Стоит подчеркнуть, что исследования реакции регионов на внешние шоки, а также оценка резилиентности региональных экономик находятся в фокусе внимания и прикладной науки. Например, консалтинговое агентство MACON представило в 2020 г. ранжированный рейтинг регионов по уровню устойчивости к пандемии COVID-19, исходя из отраслевой структуры экономики агломерации, а также экспертной оценки уязвимости и скорости восстановления каждой отрасли.

Данная работа находится в контексте вышеупомянутых направлений исследований, и ее цель состоит в выявлении отраслей, значимо связанных с динамикой валового регионального продукта (ВРП) региона.

Материалы и методы

Как правило, при изучении факторов устойчивости территорий авторы применяют методы корреляционно-регрессионного анализа и эконометрического моделирования. Устойчивость региональной экономики формализуется нами с помощью показателя динамики ВРП. В данной работе целью является не построение моделей, которые имеют высокую прогностическую силу, а тестирование гипотезы о значимости динамики той или иной отрасли для динамики ВРП регионов.

При проведении данного исследования были использованы методы анализа и синтеза, сравнения и обобщения информации, компаративный, монографический, статистический методы анализа.

Основные источники информации – данные Росстата РФ.

Исследование проведено на материалах 85 субъектов РФ. Была рассмотрена структура ВРП по 13 укрупненным видам экономической деятельности по регионам в 2019 и в 2021 гг. Для учета инфляционного фактора был

использован показатель «Изменение стоимости фиксированного набора потребительских товаров и услуг за 2020–2021 гг., в % к предыдущему декабрю». Соответственно, ВРП по регионам также анализировался за 2019 и 2021 гг.

Для выявления статистических связей между динамикой ВРП и отраслевой структурой использованы однофакторные МНК-модели на срезе регионов. Оценивание осуществлено методом наименьших квадратов (МНК). Полученные коэффициенты интерпретируются как ассоциативные, без претензии на каузальную идентификацию.

В работе была принята за основу следующая группировка отраслей (табл. 1).

Таблица 1

Укрупненные виды экономической деятельности

Обозначение группы	Наименование укрупненной группы видов экономической деятельности
SH	Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство
Dob	Добыча полезных ископаемых
Obrb	Обрабатывающие производства
Lok	Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха. Водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений
Str	Строительство
Torg	Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов
TrH	Транспортировка и хранение
GOp	Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания
Inf	Деятельность в области информации и связи
OpN	Деятельность по операциям с недвижимым имуществом
Obrz	Образование
Zdr	Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг
Dr	Другие виды деятельности

Результаты

Течение пандемии COVID-19 нельзя назвать равномерным. Анализ мировой статистики заболеваемости и смертности показывает присутствие пиковых периодов, спадов проявлений пандемии, а также различий в соотношении этих ключевых значений. Иными словами, жизненный цикл пандемии характеризовался наличием ряда фаз, укрупненно объединенных в две группы. Первая часть пандемии наблюдалась в период до приобретения коллективного иммунитета, вторая – в период, когда коллективный иммунитет был в той или иной степени приобретен (рис. 1).

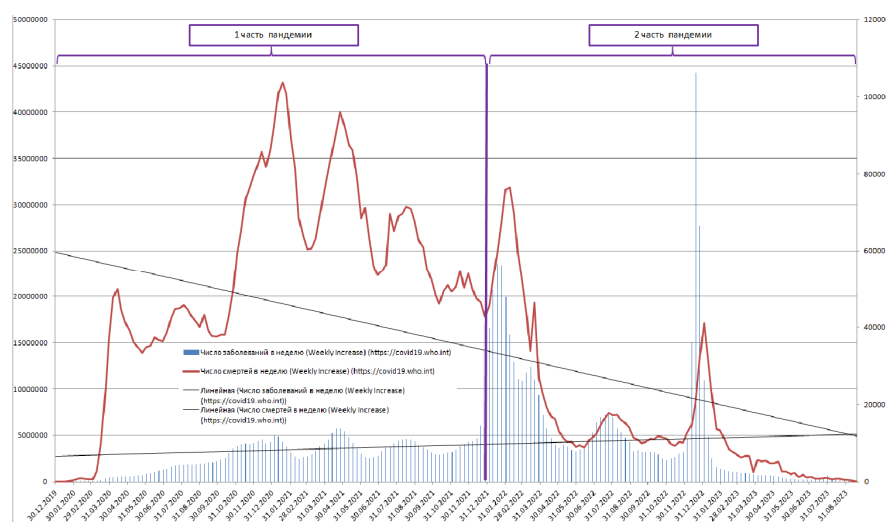


Рис. 1. Мировая динамика заболеваемости и летальных исходов в ходе пандемии COVID-19 (составлено по данным Всемирной Организации Здравоохранения¹)

В первой части пандемии число заболевших было сравнительно невелико, в частности, из-за жестких карантинных мер. При этом число умерших было высоким по отношению к относительно невысокому числу заболевших.

Во второй части пандемии число заболевших резко возросло, присутствуют периоды, когда это количество в разы превышало число заболеваний в первой части пандемии. Вместе с тем число умерших по отношению к числу заболевших было намного ниже. Настолько, что большинство стран уже не вводили столь жесткие ограничения, как это было ранее. К этому времени были введены в действие вакцины, отмечался высокий процент вакцинированного населения, это и послужило причиной относительно низкой смертности при значительном увеличении количества заболевших.

Как ожидалось, региональная отраслевая динамика отразила неравномерный ход пандемии. Вместе с тем реакция по регионам и отраслям оказалась различной.

Исследование динамики ВРП позволило выделить две группы регионов: те, у которых наблюдается рост (66 регионов), и те, у которых наблюдается падение (19 регионов) (табл. 2). Очевидно, что преобладает положительная динамика.

Таблица 2

Регионы с отрицательной динамикой ВРП

Регион	Темп роста ВРП, индекс
1	2
Тульская область	0,99
Архангельская область без авт. округа	0,97
Вологодская область	0,92
г. Санкт-Петербург	0,99
Республика Крым	0,97

¹ WHO COVID-19 dashboard. URL: <https://covid19.who.int> (дата обращения: 20.05.2025).

Окончание табл. 2

1	2
Волгоградская область	0,97
Ростовская область	0,95
Кабардино-Балкарская Республика	0,94
Республика Марий Эл	0,97
Республика Мордовия	0,98
Чувашская Республика	0,99
Саратовская область	0,99
Свердловская область	0,99
Ханты-Мансийский автономный округ	0,97
Ямало-Ненецкий автономный округ	0,99
Республика Хакасия	0,96
Иркутская область	0,95
Республика Бурятия	0,98
Еврейская автономная область	0,95

Следует отметить, что отрицательную динамику продемонстрировали крупнейшие добывающие регионы (Ямало-Ненецкий АО, Ханты-Мансийский АО) ввиду значительного снижения в 2020 г. цен на нефть и газ и последующего сокращения совокупного объема их продаж (рис. 2).

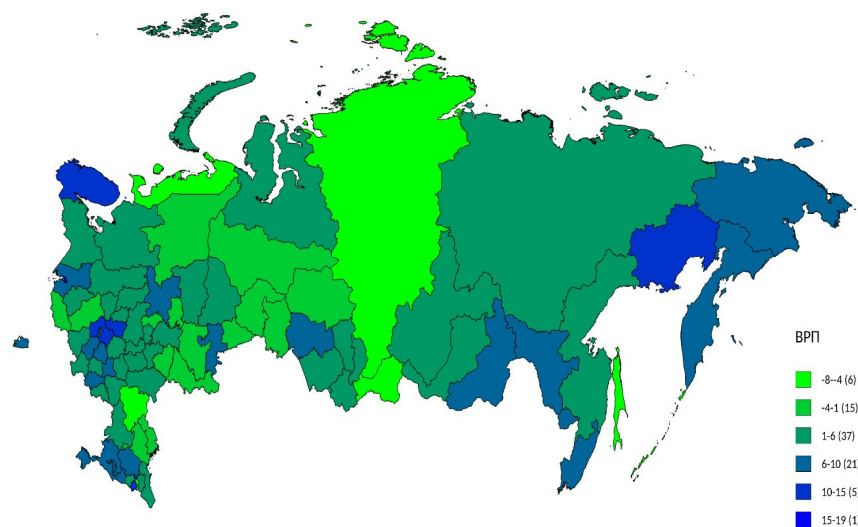


Рис. 2. Динамика ВРП в регионах РФ под воздействием пандемического шока

Если анализировать изменения в отраслевой структуре, то можно заметить, что среднее падение для отраслей с негативной динамикой составило $-5,8\%$, тогда как средний прирост отраслей с положительной динамикой составил $+15,6\%$. Именно это обуславливает тот факт, что во всех регионах положительная динамика отраслевых трансформаций перекрывает негативную. Фрагмент анализа на примере регионов ЦФО показан в табл. 3.

Таблица 3

Отраслевая динамика в ЦФО под воздействием пандемического шока

Регионы	Темп изменения ВРП в % к пред. году	Dr в ВДС	Zdr в ВДС	Obrz в ВДС	OpN в ВДС	Inf в ВДС	GOp в ВДС	TrH в ВДС	Torg в ВДС	Lok в ВДС	Obrb в ВДС	Dob в ВДС	Str в ВДС	SH в ВДС
Белгородская область	2,261	6,5	-0,7	-0,3	-1,1	-0,3	-0,1	-1,5	-2,7	-0,5	-1,1	12,4	-1,5	-1,4
Брянская область	3,079	11,7	-0,3	0	-1	-0,1	-0,5	-0,4	-1,6	0,7	1,1	0	-0,2	1,5
Владимирская область	13,129	9,7	-0,9	-0,6	-1,3	-0,3	-0,1	-1,8	-2,3	-0,7	11,1	0	-0,9	-0,4
Воронежская область	1,838	9,1	0	-0,4	0,7	0,1	-0,2	-2,8	-0,9	0,3	3,3	-0,2	-3,1	4
Ивановская область	3,720	11,6	-0,2	-0,4	-1,5	-0,2	-0,2	-0,5	0,5	-0,1	4,7	0	-0,9	0
Калужская область	6,000	10,4	0	0	-1,1	-0,2	-0,2	0,3	-1,2	0,2	4,9	0	-0,5	-0,5
Костромская область	1,187	10,2	-0,5	-0,2	0,8	0,1	-0,3	-0,8	-1,9	-0,7	3,1	0,1	0,2	0,8
Курская область	9,136	9	-0,5	-0,5	-0,1	-0,1	-0,4	-0,9	-1,4	-1,7	-2	7	-1,2	0,9
Липецкая область	7,450	7	-0,8	-0,6	-1,6	-0,8	-0,3	-0,8	-1,1	-0,8	13,2	-0,1	-1,6	-3
Московская область	11,622	14,8	-0,2	-0,3	1,5	-0,1	-0,3	-1,8	1,7	0	1,8	0	0	-0,1
Орловская область	2,731	10,2	-0,6	-0,7	1	-0,3	-0,2	-2,2	-1,4	-1	0,1	0	-2,8	8,8
Рязанская область	5,403	14,8	0	-0,3	1,7	-0,5	0,3	-1,3	-1,2	0,5	-1,6	-0,1	-0,5	2,7
Смоленская область	3,985	9,4	-0,2	-0,4	0	-0,2	-0,2	0,2	0,7	-0,7	3,1	0	-2,4	-0,2
Тамбовская область	1,246	6,1	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-1,5	-1	-0,5	1	0	-4,3	9,5
Тверская область	-0,538	13,3	0	-0,1	1,6	-0,3	-0,1	0,1	-1,4	1,2	2	0	-1,4	-0,9
Тульская область	8,954	10	-0,2	-0,2	0,1	-0,3	-0,1	-1,1	-1,2	-0,3	4,4	0	-0,7	0,1
Ярославская область	4,842	11,5	0,3	0	-0,9	-0,1	-0,1	-1,1	-0,3	0,1	0,5	0	-0,4	0,7
г. Москва	9,394	16,3	0,2	0,1	2,2	1,9	0,2	0,3	-7,7	-0,3	-0,1	0	0,9	-0,1

На рис. 3 представлена зависимость отраслевых изменений в сочетании с динамикой ВРП в регионах России в 2019–2021 гг.

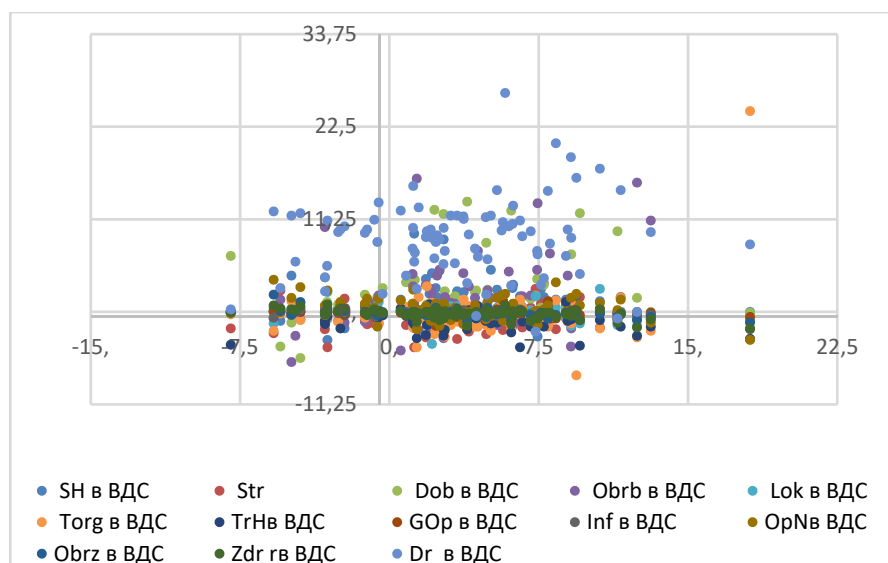


Рис. 3. График зависимости динамики ВРП от динамики отраслевой структуры в регионах России в 2019–2021 гг. (составлено по данным ФСГС¹)

Если смотреть на влияние изменения отраслевой структуры на динамику ВРП, то возможно обратиться к регрессионному исследованию. Здесь сразу стоит оговориться, что поскольку происходит моделирование влияния каждой отдельной отрасли, то объясняющая способность моделей (R^2) оказывается низкой, однако нашей задачей является не построение моделей, которые имеют высокую прогностическую силу, а тестирование гипотезы о значимости динамики той или иной отрасли для динамики ВРП регионов. Результаты моделирования для отраслей представлены ниже в табл. 4.

Таблица 4

Регрессионные модели связи ВРП (Y_i) и доли определенной отрасли в регионе (X_i)

Отрасль	Модель	R^2
1	2	3
SH	$Y_i = 3,6^{***} - 0,1 X_i$	0,00
Str	$Y_i = 3,8^{***} + 0,3 X_i$	0,01
Dob	$Y_i = 3,2^{***} + 0,2 X_i$	0,02
Obrb	$Y_i = 3,3^{***} + 0,2 X_i$	0,03
Lok	$Y_i = 3,3^{***} - 0,9 X_i$	0,03

¹ Регионы России. Социально-экономические показатели // ФСГС. 2021. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 20.05.2025).

Окончание табл. 4

1	2	3
Torg	$Y_i = 3,7^{***} + 0,3^{**} X_i$	0,05
TrH	$Y_i = 2,9^{***} - 0,8 X_i$	0,03
GOp	$Y_i = 3,5^{***} - 0,2 X_i$	0,00
Inf	$Y_i = 3,1^{***} - 3,3^{**} X_i$	0,08
OpN	$Y_i = 3,8^{***} - 0,9^{**} X_i$	0,06
Obrz	$Y_i = 2,4^{***} - 5,8^{***} X_i$	0,29
Zdr	$Y_i = 2,5^{***} - 4,5^{***} X_i$	0,27
Dr	$Y_i = 2,6^{***} + 0,1 X_i$	0,01

Примечание. Оценивание – метод наименьших квадратов, однофакторные спецификации вида $Y_i = \alpha + \beta k \cdot X_{i,k} + \varepsilon_i$. Уровни значимости: $*p < 0,10$; $**p < 0,05$; $***p < 0,01$.

Из таблицы видно, что выделяется группа из пяти отраслей, которая значимо связана с динамикой ВРП. При этом отрасль торговли (Torg) имеет положительную связь, т.е. изменения ВРП и доли отрасли сонаправлены. С другой стороны, выделяются отрасли «Деятельность в области информации и связи» (Inf), «Деятельность по операциям с недвижимым имуществом» (OpN), «Образование» (Obrz), «Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг» (Zdr), для которых характерна обратная связь с динамикой ВРП.

Заключение

Проведенный анализ показал, что наиболее уязвимыми к пандемическим шокам оказались регионы с производственной структурой, ориентированной на добычу полезных ископаемых. Указанный шок сильнее затронул добычу топливно-энергетических ресурсов, несмотря на то, что эта отрасль является базовой для ряда регионов России. Вместе с тем регионы с преобладанием обрабатывающего сектора отличались более высокой устойчивостью. Кроме того, уязвимыми к пандемическому шоку и в то же время значимыми с точки зрения вклада в динамику ВРП оказались отрасли торговли, информации и связи, операций с недвижимым имуществом, здравоохранения и социальных услуг.

Из проведенного исследования можно также сделать косвенные выводы об отраслевых факторах устойчивости регионов. Эти выводы коррелируют с ранее проведенными исследованиями других ученых. Например, исследования влияния отраслевой структуры на устойчивость экономики европейских регионов [7, 19] свидетельствуют о низкой устойчивости регионов с преобладающей долей промышленного сектора и строительства. Одновременно они выявили положительное влияние сектора услуг на устойчивость регионов. Поскольку эти виды экономической деятельности активно развиваются

прежде всего на территориях с высоким уровнем урбанизации, их вклад в прирост ВДС оказался наибольшим в Центральном федеральном округе и Северо-Западном федеральном округе [1]. В целом можно заметить, что сектор коммерческих услуг выполнял стабилизирующую роль во всех российских регионах. Наши результаты отчасти подтверждают эти выводы. Можно предположить, что данный сектор оказывается более устойчивым к кризисам из-за его гибкости и более высокой приспособляемости.

В работе Н. Н. Михеевой [1] получены схожие результаты. Автор подчеркивает, что «важным фактором устойчивости является специализация регионов». Так, факторами устойчивости стала высокая доля сельского хозяйства и обрабатывающей промышленности в структуре региональной экономики. Что касается добывающих регионов, то они в основном вошли в категорию неустойчивых. Устойчивыми же оказались некоторые дальневосточные регионы за счет активного ввода новых мощностей.

Аналогично в работе М. Ю. Малкиной [32] была обнаружена большая уязвимость к пандемии экономик крупных развитых урбанизированных регионов с более высоким качеством человеческого капитала, а также регионов с развитой добывающей промышленностью.

Из проведенного нами исследования можно сделать вывод, что шоки, имевшие место в 2020 г., прежде всего негативно сказываются на отраслях, связанных с качеством жизни и человеческим капиталом. В этом отношении большую роль приобретают как системные трансформации, призванные изменить характер взаимосвязи между этими отраслями и динамикой ВРП в долгосрочном горизонте, так и институциональные воздействия, которые в краткосрочном горизонте должны купировать негативные тенденции. Для проведения подобных трансформационных изменений и конструирования устойчивой отраслевой структуры экономики регионов целесообразно применение DEA-инструментария, позволяющего оптимизировать траекторию развития социально-экономических систем регионов.

К ограничениям проведенного исследования стоит отнести следующие:

1. Исследование охватывает 2019–2021 гг., трактуемые как период шока (пандемия) и первичного постшокового восстановления. Экстраполяция полученных результатов на более длительный горизонт требует дополнительной эмпирической проверки.

2. Поскольку объясняющие переменные заданы в долях, наблюдаемые отрицательные ассоциации интерпретируются с учетом композиционного эффекта. Они отражают относительные изменения структуры при сжатии или расширении общего выпуска и не трактуются как причинное влияние соответствующих секторов на динамику ВРП. Корректировки на инфляцию реализованы в рамках принятых допущений и могут отличаться от официальных дефляторов по отраслям, что потенциально влияет на величину оценок.

3. Зафиксированные однофакторные МНК-связи между динамикой ВРП и долями укрупненных отраслей в структуре ВДС/ВРП в условиях шока и постшокового восстановления интерпретируются как статистические ассоциации; причинно-следственные выводы в рамках данного исследования не формулируются. Возможны смещения, связанные с пропущенными факторами (урбанизация, исходная отраслевая структура, параметры бюджетной системы, демография и др.), гетероскедастичностью, влиянием крайних наблюдений, а также обратной причинностью.

4. Региональные реакции на шок неоднородны (столичные, ресурсные, моноотраслевые и др.). Следовательно, внешняя валидность результатов ограничена, а перенос выводов на все типы регионов должен осуществляться с осторожностью.

Отрицательные коэффициенты по образованию, здравоохранению, операциям с недвижимым имуществом и ИКТ не свидетельствуют о подавляющем влиянии данных отраслей на экономический рост. В период шока их доли могут возрасти контрциклично вследствие сжатия частного спроса в иных секторах, что при фиксированной сумме долей статистически порождает отрицательные ассоциации. Следовательно, наблюдаемые связи отражают композиционный эффект, а не оценку социальной отдачи от вложений в человеческий капитал.

Положительный знак для коэффициента торговли интерпретируется как индикатор краткосрочной резилиентности, обусловленной ролью потребительского спроса и логистической адаптации в постпандемический восстановительный период. При этом связь не должна восприниматься как достаточное условие долгосрочного повышения производительности без сопутствующих структурных преобразований.

В краткосрочном горизонте целесообразны меры по стабилизации звеньев цепей поставок и поддержке сектора малого и среднего предпринимательства, устранению логистических «узких мест», а также адресная поддержка наиболее уязвимых групп. В долгосрочном горизонте приоритетами выступают инвестиции в человеческий капитал и цифровую инфраструктуру, технологическое обновление обрабатывающей промышленности и диверсификация отраслевой (базовой) специализации регионов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований представляются следующие: анализ гетерогенности эффектов по типам регионов; проверки устойчивости к альтернативным схемам отраслевой агрегации и вариантам инфляционной корректировки показателей; проверки чувствительности к исключению столичных и ресурсных регионов; использование методов Data Envelopment Analysis (DEA) для оценки эффективности и оптимизации траекторий социально-экономического развития регионов и повышения их резилиентности к внешним шокам.

Список литературы

1. Михеева Н. Н. Устойчивость экономики российских регионов к внешним шокам: оценка на основе оперативной информации // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. № 1. С. 151–174. doi: 10.47711/2076-3182-2023-1-151-174
2. Оценка влияния кризиса, связанного с пандемией COVID-19, на отрасли российской экономики и их посткризисное развитие : докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества (Москва, 13–30 апреля 2021 г.) / рук. авт. кол. Ю. В. Симачев. М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 45 с.
3. Зубаревич Н. В. Влияние пандемии на социально-экономическое развитие и бюджеты регионов // Вопросы теоретической экономики. 2021. № 1. С. 48–60. doi: 10.24411/2587-7666-2021-10104

4. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Shmatko A. An Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development // *Sustainability*. 2022. № 14 (2). P. 704. doi: 10.3390/su14020704
5. Климанов В. В., Казакова С. М., Михайлова А. А. Региональная резилиентность: теоретические основы постановки вопроса // *Экономическая политика*. 2018. Т. 13, № 6. С. 164–187. doi: 10.18288/1994-5124-2018-6-164-187
6. Гамидуллаева Л. А. Региональная экономическая устойчивость: библиометрический анализ исследований // *π-Economy*. 2024. Т. 17, № 1. С. 70–87. doi: 10.18721/JE.17105 EDN: LZRSSX
7. Martin R. Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessary Shocks // *Journal of Economic Geography*. 2012. № 1 (1). P. 1–32. doi: 10.1093/jeg/lbr019
8. Ускова А. Ю., Саломатова Ю. В. Оценка факторов устойчивости обрабатывающих производств в индустриальных регионах России // *Экономика промышленности*. 2023. № 16 (1). С. 77–85. doi: 10.17073/2072-1633-2023-1-77-85
9. Доржиева В. В. Современные тенденции развития обрабатывающей промышленности России и ее конкурентоспособность в условиях новой промышленной революции // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2019. № 9 (5-1). С. 194–202.
10. Смородинская Н. В., Катуков Д. Д. Резильентность экономических систем в эпоху глобализации и внезапных шоков // *Вестник Института экономики Российской академии наук*. 2021. № (5). С. 93–115. doi: 10.52180/2073-6487_2021_5_93_115
11. Boschma R. Towards an Evolutionary Perspective on Regional Resilience // *Regional Studies*. 2015. № 49 (5). P. 733–751. doi: 10.1080/00343404.2014.959481
12. Tan J., Hu X., Hassink R., Ni J. Industrial Structure or Agency: What Affects Regional Economic Resilience? Evidence from Resource-Based Cities in China // *Cities*. 2020. № 106. doi: 10.1016/j.cities.2020.102906
13. Tan B. Y. Q., Chew N. W. S., Lee G. K. H. [et al]. Psychological Impact of the COVID-19 Pandemic on Health Care Workers in Singapore // *Annals of internal medicine*. 2020. № 173 (4). P. 317–320. doi: 10.7326/M20-1083
14. Adler P., Florida R., Hartt M. Mega Regions and Pandemics // *Tijds. voor econ. en Soc. Geog.* 2020. № 111. P. 465–481. doi: 10.1111/tesg.12449
15. Ascani A., Faggian A., Montresor S. The geography of COVID-19 and the structure of local economies: The case of Italy // *Journal of Regional Science*. 2020. № 61 (2). P. 407–441.
16. Arbolino R., Di Caro P. Can the EU funds promote regional resilience at time of Covid-19? Insights from the Great Recession // *Journal of Policy Modeling*. 2021. № 43 (1). P. 109–126. doi: 10.1016/j.jpolmod.2020.10.001
17. Alexeev M., Yushkov A. The Fiscal Impact of the COVID-19 Pandemic on Subnational Governments: The Case of Russia // *Public Finance Review*. 2022. № 50 (3). P. 239–278. doi: 10.1177/10911421221097785
18. Klimanov V., Kazakov S., Mikhaylov A., Safina A. Fiscal Resilience of Russia's Regions in the Face of COVID-19 // *Journal of Public Budgeting, Accounting & Financial Management*. 2021. № 33 (1). P. 87–94. doi: 10.1108/JPBAFM-07-2020-0123
19. Lagravinese R. Economic crisis and rising gaps North–South: evidence from the Italian regions // *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, Cambridge Political Economy Society*. 2015. № 8 (2). P. 331–342.
20. Brown L., Greenbaum R. T. The role of industrial diversity in economic resilience: An empirical examination across 35 years // *Urban Studies*. 2017. № 54 (6). P. 1347–1366. doi: 10.1177/0042098015624870
21. Fingleton B., Garretsen H., Martin R. Shocking aspects of monetary union: the vulnerability of regions in Euroland // *Journal of Economic Geography*. 2015. doi: 10.1093/jeg/lbu055
22. Kluge J. Sectoral diversification as insurance against economic instability // *J Regional Sci.* 2018. № 58. P. 204–223. doi: 10.1111/jors.12349

23. Angelopoulos S., de Silva A., Navon Y. [et al.] Economic Resilience in a Pandemic: Did COVID-19 Policy Effects Override Industry Diversity Impacts in Australia? // *Econ Pap.* 2023. № 42. P. 153–171. doi: 10.1111/1759-3441.12384
24. Xiao J., Boschma R., Andersson M. Resilience in the European Union: The Effect of the 2008 Crisis on the Ability of Regions in Europe to Develop New Industrial Specializations // *Industrial and Corporate Change.* 2018. Vol. 27, is. 1. P. 15–47. doi: 10.1093/icc/dtx023
25. Cainelli G., Ganau R., Modica M. Does Related Variety Affect Regional Resilience? New Evidence from Italy // *The Annals of Regional Science.* 2019. № 62 (3). P. 657–680. doi: 10.1007/s00168-019-00911-4
26. Rios V., Gianmoena L. On the link between temperature and regional COVID-19 severity: Evidence from Italy // *Regional Science Policy & Practice.* 2021. № 13 (S1). P. 109–137. doi: 10.1111/rsp3.12472
27. Dunford M., Qi B. Global reset: COVID-19, systemic rivalry and the global order // *Research in Globalization* 2020. № 2. doi: 10.1016/j.resglo.2020.100021
28. Hoekman B., Nelson D. Rethinking international subsidy rules // *World Econ.* 2020. № 43. P. 3104–3132. doi: 10.1111/twec.13022
29. Martin R., Sunley P., Gardiner B., Tyler P. How Regions React to Recess Resilience and the Role of Economic Structure // *Regional Studies.* 2016. № 50 (4). P. 561–585. doi: 10.1080/00343404.2015.1136410
30. Diodato D., Weterings A. B. R. The resilience of regional labour markets to economic shocks: Exploring the role of interactions among firms and workers // *Journal of Economic Geography.* 2015. № 15 (4). P. 723–742. doi: 10.1093/jeg/lbu030
31. Рослякова Н. А., Дорофеева Л. В. Новая Великая депрессия на фоне коронавирусной пандемии: проверка теории Кейнса для регионов России // *Региональная экономика. Юг России.* 2021. Т. 9, № 4. С. 26–36. doi: 10.15688/re.volsu.2021.4.3
32. Малкина М. Ю. Устойчивость экономик российских регионов к пандемии 2020 // *Пространственная экономика.* 2022. Т. 18, № 1. С. 101–124. doi: 10.14530/se.2022.1.101-124

References

1. Mikheeva N.N. Resilience of Russian Regions to External Shocks: Assessment Based on Operational Information. *Nauchnye trudy: Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya RAN = Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences.* 2023;(1):151–174. (In Russ). doi: 10.47711/2076-3182-2023-1-151-174
2. Simachev Yu.V. (head of the authors' collective). *Ocenka vliyaniya krizisa, svyazanogo s pandemiej COVID-19, na otrasli rossijskoj ekonomiki i ih postkrizisnoe razvitie: dokl. k XXII Apr. mezhdunar. nauch. konf. po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva (Moskva, 13–30 aprelya 2021 g.) = Assessment of the impact of the crisis related to the COVID-19 pandemic on the sectors of the Russian economy and their post-crisis development: report to the XXII Apr. International Scientific Conference on Economic and Social Development (Moscow, April 13–30, 2021).* Moscow: Izd. dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2021:45. (In Russ)
3. Zubarevich N.V. The impact of the pandemic on socio-economic development and regional budgets. *Voprosy teoreticheskoy ekonomiki = Questions of theoretical economics.* 2021;(1):48–60. (In Russ). doi: 10.24411/2587-7666-2021-10104
4. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Shmatko A. An Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development. *Sustainability.* 2022;(14):704. doi: 10.3390/su14020704
5. Klimanov V.V., Kazakova S.M., Mikhailova A.A. Regional resistance: theoretical foundations of the question. *Ekonomicheskaya politika = Economic policy.* 2018;13(6):164–187. (In Russ). doi: 10.18288/1994-5124-2018-6-164-187

6. Gamidullayeva L.A. Regional economic sustainability: a bibliometric analysis of research. *π-Economy*. 2024;17(1):70–87. (In Russ). doi: 10.18721/JE.17105 EDN: LZRSSX
7. Martin R. Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessionary Shocks. *Journal of Economic Geography*. 2012;(1):1–32. doi: 10.1093/jeg/lbr019
8. Uskova A.Yu., Salomatova Yu.V. Assessment of factors of sustainability of manufacturing industries in the industrial regions of Russia. *Ekonomika promyshlennosti = Industrial economics*. 2023;(16):77–85. (In Russ). doi: 10.17073/2072-1633-2023-1-77-85
9. Dorzhieva V.V. Modern trends in the development of the Russian manufacturing industry and its competitiveness in the context of the new industrial revolution. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra = Economics: yesterday, today, tomorrow*. 2019;(9):194–202. (In Russ)
10. Smorodinskaya N.V., Katukov D.D. The resilience of economic systems in the era of globalization and sudden shocks. *Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2021;(5): 93–115. (In Russ). doi: 10.52180/2073-6487_2021_5_93_115
11. Boschma R. Towards an Evolutionary Perspective on Regional Resilience. *Regional Studies*. 2015;49:733–751. doi: 10.1080/00343404.2014.959481
12. Tan J., Hu X., Hassink R., Ni J. Industrial Structure or Agency: What Affects Regional Economic Resilience? Evidence from Resource-Based Cities in China. *Cities*. 2020;(106). doi: 10.1016/j.cities.2020.102906
13. Tan B.Y.Q., Chew N.W.S., Lee G.K.H. et al. Psychological Impact of the COVID-19 Pandemic on Health Care Workers in Singapore. *Annals of internal medicine*. 2020;(173):317–320. doi: 10.7326/M20-1083
14. Adler P., Florida R., Hartt M. Mega Regions and Pandemics. *Tijds. voor econ. en Soc. Geog.* 2020;(111):465–481. doi: 10.1111/tesg.12449
15. Ascani A., Faggian A., Montresor S. The geography of COVID-19 and the structure of local economies: The case of Italy. *Journal of Regional Science*. 2020;(61):407–441.
16. Arbolino R., Di Caro P. Can the EU funds promote regional resilience at time of Covid-19? Insights from the Great Recession. *Journal of Policy Modeling*. 2021;(43):109–126. doi: 10.1016/j.jpolmod.2020.10.001
17. Alexeev M., Yushkov A. The Fiscal Impact of the COVID-19 Pandemic on Subnational Governments: The Case of Russia. *Public Finance Review*. 2022;(50):239–278. doi: 10.1177/10911421221097785
18. Klimanov V., Kazakov S., Mikhaylov A., Safina A. Fiscal Resilience of Russia's Regions in the Face of COVID-19. *Journal of Public Budgeting, Accounting & Financial Management*. 2021;(33):87–94. doi: 10.1108/JPBAFM-07-2020-0123
19. Lagravinense R. Economic crisis and rising gaps North–South: evidence from the Italian regions. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, Cambridge Political Economy Society*. 2015;(8):331–342.
20. Brown L., Greenbaum R.T. The role of industrial diversity in economic resilience: An empirical examination across 35 years. *Urban Studies*. 2017;(54):1347–1366. doi: 10.1177/0042098015624870
21. Fingleton B., Garretsen H., Martin R. Shocking aspects of monetary union: the vulnerability of regions in Euroland. *Journal of Economic Geography*. 2015. doi: 10.1093/jeg/lbu055
22. Kluge J. Sectoral diversification as insurance against economic instability. *J Regional Sci.* 2018;(58):204–223. doi: 10.1111/jors.12349
23. Angelopoulos S., de Silva A., Navon Y. et al. Economic Resilience in a Pandemic: Did COVID-19 Policy Effects Override Industry Diversity Impacts in Australia? *Econ Pap.* 2023;(42):153–171. doi: 10.1111/1759-3441.12384
24. Xiao J., Boschma R., Andersson M. Resilience in the European Union: The Effect of the 2008 Crisis on the Ability of Regions in Europe to Develop New Industrial Specializations. *Industrial and Corporate Change*. 2018;27(1):15–47. doi: 10.1093/icc/dtx023

25. Cainelli G., Ganau R., Modica M. Does Related Variety Affect Regional Resilience? New Evidence from Italy. *The Annals of Regional Science*. 2019;(62):657–680. doi: 10.1007/s00168-019-00911-4
26. Rios V., Gianmoena L. On the link between temperature and regional COVID-19 severity: Evidence from Italy. *Regional Science Policy & Practice*. 2021;13(S1):109–137. doi: 10.1111/rsp3.12472
27. Dunford M., Qi B. Global reset: COVID-19, systemic rivalry and the global order. *Research in Globalization*. 2020;(2). doi: 10.1016/j.resglo.2020.100021
28. Hoekman B., Nelson D. Rethinking international subsidy rules. *World Econ.* 2020;(43):3104–3132. doi: 10.1111/twec.13022
29. Martin R., Sunley P., Gardiner B., Tyler P. How Regions React to Recess Resilience and the Role of Economic Structure. *Regional Studies*. 2016;(50):561–585. doi: 10.1080/00343404.2015.1136410
30. Diodato D., Weterings A.B.R. The resilience of regional labour markets to economic shocks: Exploring the role of interactions among firms and workers. *Journal of Economic Geography*. 2015;(15):723–742. doi: 10.1093/jeg/lbu030
31. Roslyakova N.A., Dorofeeva L.V. The new Great Depression against the background of the Coronavirus pandemic: a test of Keynes' theory for the regions of Russia. *Regional'naya ekonomika. Yug Rossii = Regional economy. The South of Russia*. 2021;9(4):26–36. (In Russ). doi: 10.15688/re.volsu.2021.4.3
32. Malkina M.Y. Resilience of Russian regions' economies to the 2020 pandemic. *Prostranstvennaya ekonomika = Spatial economics*. 2022;18(1):101–124. (In Russ). doi: 10.14530/se.2022.1.101-124

Информация об авторах / Information about the authors

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)

Наталья Андреевна Рослякова

кандидат экономических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории экономической
динамики и управления инновациями,
Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Рабочая, 25)
E-mail: na@roslyakova24.ru

Natalia A. Roslyakova

Candidate of economical sciences,
senior researcher of the laboratory
of economic dynamics and innovation
management,
V.A. Trapeznikov Institute of Control
Sciences of Russian Academy of Sciences
(25 Rabochaya street, Moscow, Russia)

Сергей Михайлович Васин

доктор экономических наук,
профессор, проректор по научной
работе и инновационной деятельности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: pspu-met@mail.ru

Sergey M. Vasin

Doctor of economical sciences, professor,
vice rector for research and innovation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 16.07.2025

Поступила после рецензирования/Revised 12.08.2025

Принята к публикации/Accepted 15.08.2025

РОЛЬ БИРЖЕВЫХ ТОРГОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЗРАЧНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ОТРАСЛЕВОГО ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ

Ю. В. Малахова¹, Е. А. Бадеева², Д. А. Булдыгин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹borisylka@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru, ³b2004den@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Товарные биржи играют важную роль в развитии экономики страны. Они дают возможность определить емкость рынка и условия конкуренции, обменяться информацией и способствуют оптимальному ценообразованию. Цены, установленные на бирже, служат ориентиром для других рынков. Раскрывается роль биржевых торгов щебнем как перспектива развития рынка строительных материалов. Цель работы состоит в исследовании необходимости организации биржевых торгов строительных материалов с целью формирования прозрачной системы ценообразования и повышения собираемости налогов в бюджет. *Материалы и методы.* Проведен анализ ценообразования на ряд позиций строительных материалов, выявлена необходимость развития биржевых торгов как источника информации для регулирования со стороны государства, в частности налоговых органов. При проведении исследования были применены общенаучные методы исследования: индукция, анализ и обобщение данных. *Результаты.* Проведена классификация потенциального биржевого товара – щебня, которая поможет покупателям выбрать нужную марку в зависимости от ее предназначения. Принятая классификация, отражающая свойства и назначение щебня, не только будет способствовать прозрачности сделок, но и предотвратит уклонение от уплаты налогов. *Выводы.* Развитие биржевой торговли как единого центра ценообразования на рынке строительных материалов создаст множество удобств для участников рынка и для государства.

Ключевые слова: биржевые торги, децентрализация биржи, классификация по товарным маркам, рынок строительных материалов, ценообразование

Для цитирования: Малахова Ю. В., Бадеева Е. А., Булдыгин Д. А. Роль биржевых торгов в обеспечении прозрачности механизмов отраслевого ценообразования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 22–33. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-2

THE ROLE OF EXCHANGE TRADING IN ENSURING TRANSPARENCY OF INDUSTRY PRICING MECHANISMS

Yu.V. Malakhova¹, E.A. Badeeva², D.A. Buldygin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia
¹borisylka@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru, ³b2004den@gmail.com

Abstract. *Background.* Commodity exchanges play an important role in the development of the country's economy. They provide an opportunity to determine the market capacity and competition conditions, exchange information and contribute to optimal pricing. Prices set on the exchange serve as a benchmark for other markets. The article reveals the role of exchange trading in crushed stone as prospects for the development of the construction materials market. The purpose of the study is to investigate the need to organize exchange trades of building materials in order to form a transparent pricing system and increase tax collection in the budget. *Materials and methods.* The analysis of pricing for a number of building materials positions was conducted and the need for developing exchange trades as a source of information for regulation by the state, in particular tax authorities, was identified. General scientific research methods were used in the study: induction, analysis and generalization of data. *Results.* A classification of a potential exchange commodity – crushed stone – has been carried out, which will help buyers choose the right grade depending on its purpose. The adopted classification, reflecting the properties and purpose of crushed stone, will not only promote the transparency of transactions, but will also prevent tax evasion. *Conclusions.* The development of exchange trading as a single center for pricing in the construction materials market will create many conveniences for market participants and for the state.

Keywords: exchange trading, exchange decentralization, classification by trademarks, building materials market, pricing

For citation: Malakhova Yu.V., Badeeva E.A., Buldygin D.A. The role of exchange trading in ensuring transparency of industry pricing mechanisms. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):22–33. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-2

Введение

Развитие деятельности товарных бирж как части современной экономики связано с запросами не только их непосредственных участников, но и государства. Развитие организованных биржевых торгов можно рассматривать как фактор прозрачности и объективности ценообразования, как методы оптимизации товарных рынков и их влияние на экономику в целом. Биржевые торги на щебень и другие строительные материалы в перспективе будут являться источником информации для государства и налоговых органов и тем самым выведут строительную отрасль на легальный уровень.

В августе 2024 г. на восточной товарной бирже были запущены биржевые торги на щебень. В перспективе, по словам руководства биржи, планируется запуск торгов на другие строительные материалы. Одно из возможных применений подобных торгов, как заявлено организаторами торгов, – это использование данных в налогообложении [1–3].

Ранее централизованных торгов подобными материалами не существовало, а потому все торги или проводились неформально, или не проводились вовсе, а ценообразование происходило преимущественно за счет прямого договора между поставщиком и покупателем.

При этом строительная отрасль, по понятным причинам выступающая основным потребителем строительных товаров, является одной из самых коррумпированных сфер российской экономики, поэтому со стороны государства однозначно существует запрос на любые меры по выводу данной отрасли в «белую» часть экономики.

Объектом исследования выступают механизмы использования информации биржевых торгов в борьбе с уклонением от уплаты налогов.

Предмет исследования – организация биржевых торгов строительных материалов, в частности щебня, как наиболее значимой расходной части в бюджете на строительство тех или иных объектов.

Материалы и методы

За 2024 г. российскими предприятиями было выпущено 111 550 тыс. м³ щебня. При этом объем инфраструктурного строительства за тот же период составил 30 трлн руб. Очевидно, что щебень не является ключевой расходной статьей в бюджете данных проектов, однако на него в любом случае приходится значимая доля итоговой сметы.

Потенциально данные рыночных торгов могут использоваться при проверке отчетности организаций, реализующих данные товары, путем сопоставления их цен с рыночными. Значительное превышение или занижение цен реализации может стать основанием для разного рода проверок, а также может быть использовано в качестве аргумента, например, в деле о преднамеренном банкротстве или при анализе уклонения от налогов.

В теории при проверке отчетности налоговая может сравнить отпускные цены на предприятии с биржевыми ценами, на основании чего сделать вывод о преднамеренном завышении/занижении цены с целью уклонения от налогов или фальсификации отчетности [4–6].

Попробуем применить описанный ранее метод и сравним цены. Так, рассмотрим щебень известняковый фракции 20-40, ГОСТ 8267-93. По последним торговым данным, цена за тонну щебня, добытого в Подмосковье, составляет 1100 руб. В то же время цены на подобную марку щебня на публичных агрегаторах и специализированных сайтах крайне серьезно варьируются: от 500 руб. за тонну до 4000 тыс., но цены в небольшом количестве объявлений находились в сходном диапазоне (1000–1500 руб. за тонну). Все рассмотренные объявления были опубликованы не физическими, а юридическими лицами или посредниками между карьерами и потребителями, что положительно сказывается на качестве сравнения.

При этом очевидно, что данная разница не всегда показывает какие-либо манипуляции – каждый карьер отличается по материально-техническому оснащению, объемам добычи и количеству персонала, что может значительно влиять на итоговую себестоимость продукции.

Привести показатели к какому-то среднему по России или как минимум среднему по региону/округу показателю возможно в том случае, если все операции по купле-продаже будут проводиться на организованной бирже. В таком случае близкорасположенные карьеры действительно могут начать конкуренцию между собой или как минимум привести цены к среднему показателю.

Стоит понимать, что снижение цен не гарантировано – не исключено возникновение олигополии или монополии, в случае если одна или несколько компаний обладают куда большим запасом финансовой прочности или лучшим материально-техническим оснащением. Тогда остальные компании или будут вынуждены окончательно уйти в тень, или столкнутся с финансовыми проблемами.

При этом даже в случае снижения цен не все потребители смогут ими воспользоваться. Щебень и прочие строительные материалы достаточно дорого транспортировать, если речь не идет о транспортировке огромных партий

железнодорожным транспортом. Иными словами, рядовой потребитель, нуждающийся в сравнительно небольшом объеме материалов, столкнется с ситуацией, в которой стоимость доставки нивелирует разницу в цене [7–9].

Иными словами, кажется, что на данный момент подобные меры ввиду своей неработоспособности даже в случае их введения, что также крайне маловероятно, не помогут ни в вопросах налогообложения, ни в снижении цен.

Однако данная ситуация нехарактерна для других товаров, например древесины. Так, при биржевой цене на пиломатериалы хвойных пород (0–2 сорт, длина от 4,0 до 6,0 м, толщина от 20 до 250 мм, ширина от 90 до 250 мм, ГОСТ 8486–86) в 15 200 или 17 480 руб. за 1 м³ (в зависимости от пункта поставки). Цена на рынке и среди упомянутых ранее агрегаторов варьируется в районе 13–20 тыс. руб. Различия в стоимости объясняются большой вариативностью размера и толщины материала, указанных в ГОСТе. Данная ситуация характерна и для прочих товаров раздела «Лес и лесоматериалы».

К товарам с подобным ценообразованием можно отнести лом черных и цветных металлов, биржевые цены если и отличаются от рыночных цен, то на 1–2 руб., что также коррелирует со стоимостью доставки до покупателя.

При этом в случае с ломом цветных и черных металлов, а также ценами на пиломатериалы следует отметить не просто соответствие биржевых цен со средними ценами по РФ, но и соответствие с международными ценами. Первопричина подобной корреляции – обширные возможности по экспорту в Китай или другие соседние страны.

Очевидно, что в случае с щебнем речи о масштабном экспорте не идет. Ключевыми покупателями российского щебня являются Беларусь (80 % всего экспорта) и Казахстан (10 %). Обе страны являются значимыми торговыми партнерами, а также, что немаловажно, их экономики в большой степени зависят от экономики РФ [10, 11].

Следствием этого является и корреляция между ценами на подобные товары, однако, как и в случае с «внутрироссийским» щебнем, разница в ценах между разными (в том числе иностранными) месторождениями нивелируется стоимостью доставки.

Все это подтверждает ранее сказанное предположение о том, что торги на единственной для всей России бирже не могут выступать источником информации при осуществлении проверок. Из этого может быть несколько выходов.

Первый заключается в «децентрализации» биржи на региональные/окружные представительства. Логично разделить общий пул запросов на покупку/продажу товаров по географическому признаку, что упростит организацию торгов для самой биржи, а также участие в торгах для покупателей.

Мировой опыт биржевой торговли показывает, что ключевые товарные биржи сосредоточены на активах, имеющих глобальное значение, а не только локальный спрос. Например, в США работает 11 бирж, пять из которых находятся в Нью-Йорке, и даже те из них, которые занимаются товарными операциями, торгуют в основном нефтью, газом, металлами и сельхозпродукцией. Эти товары привлекают в первую очередь международных инвесторов и трейдеров, а не местных потребителей, поскольку их цены формируются под влиянием мирового спроса и предложения. Это подтверждает, что биржевые

площадки наиболее эффективны там, где речь идет о стандартизированных и ликвидных активах, интересующих широкий круг участников глобального рынка [12].

К тому же такое решение подразумевает организацию фактически филиалов бирж, что, в свою очередь, требует увеличения штата биржи в разы. При этом очевидно, что кадры, требуемые для организации филиалов и представительства, в какой-то мере уникальны для российского рынка труда, что также усложнит подобное решение.

Второй выход – изменение организации торгов лишь с виртуальным разделением торгов. Например, компания из Пензенской области при выходе на биржу будет автоматически определяться на площадку, созданную для компаний из центральной России.

В любом случае возникает необходимость в масштабировании торгов на уже имеющейся Восточной бирже. Для этого к торгам следует привлечь крупные добывающие компании разных регионов РФ, а также крупных потребителей полезных ископаемых подобного рода, например строительные компании.

В первую очередь это может касаться упрощения доступа на биржу как для поставщиков, так и для потребителей. Впрочем, ликвидация разного рода бюрократических проволочек не должна привести к падению качества реализуемой продукции или к снижению уровня организации торгов. Однако есть альтернативный путь.

Введение института «товарного брокерства» могло бы стать эффективным инструментом для компаний, стремящихся оптимизировать закупки сырья или сбыт продукции без прямого участия в биржевых операциях. В этой модели уполномоченный брокер выступал бы профессиональным посредником, анализируя рынок, выявляя наиболее выгодные предложения и проводя сделки в интересах клиента. Такой подход позволил бы предприятиям, особенно среднему и малому бизнесу, минимизировать транзакционные издержки, снизить риски неоптимальных закупок и сэкономить ресурсы на самостоятельном мониторинге бирж. При этом брокер, действуя в рамках четкого договора, обеспечивал бы прозрачность операций и защиту интересов компании, предлагая не только доступ к товарным площадкам, но и экспертные консультации по хеджированию ценовых рисков.

При этом, так как государство заинтересовано если не в публичности, то как минимум в прозрачности ценообразования при заключении контрактов на поставку стройматериалов, возможно законодательное стимулирование/принуждение к заключению контрактов на поставку материалов. Например, одним из критериев прозрачности и экономической целесообразности сделки может выступать ее заключение в ходе публичных торгов или по цене, полученной в ходе публичных торгов на бирже или с привязкой к ней.

В то же время биржа может привлечь логистические компании для осуществления так называемого «постпродажного сопровождения/обслуживания» и доставки материалов от поставщика покупателям. В таком случае все остаются в выигрыше: покупатель и продавец избегают проблем с доставкой материала, логистическая компания получает новые заказы, а биржа – очередной аргумент в пользу использования ее услуг.

К подобной мере также можно отнести аналитику от сотрудников биржи, например, о средней цене, а также предоставление прогнозов цены на

разный срок. Такие услуги могут помочь избежать переплат или подозрительных сделок при заключении договоров.

В целом политика стимулирования/принуждения к переходу ряда компаний, о которых уже говорилось ранее, к заключению контрактов на товарных биржах со стороны государства не должна быть односторонней. Со стороны государства к бирже должен быть предъявлен ряд требований.

Во-первых, они должны касаться информационной поддержки и помощи компании при участии в торгах или при выходе на биржу. Для этого нужен как специальный отдел по работе с компаниями, так и виртуальный банк знаний, содержащий инструкции, ответы на самые частые вопросы, а также примеры существующих успешных кейсов.

Во-вторых, участники торгов должны получить страхование на протяжении всего времени на бирже, что повысит доверие к организаторам. При этом гарантии не должны быть односторонними, компании также должны гарантировать свое участие, например, механизмом гарантийных депозитов.

В-третьих, характерной чертой всех товарных бирж является стандартизация реализуемой продукции. Так, например, торговля зерном и нефтью стандартизирована через биржевые контракты, которые унифицируют ключевые параметры. Для зерна (пшеница, кукуруза) устанавливаются стандарты по классам качества (содержание клейковины, влажность), базовым объемам (например, 5000 бушелей на Чикагской бирже) и точкам поставки (черноморские порты для российского зерна).

Нефтяные контракты (Brent, WTI) фиксируют марку нефти, объемы (1000 баррелей на контракт), физико-химические свойства (содержание серы, плотность) и места поставки (например, терминал Кушинг для WTI). Такая стандартизация позволяет торговать этими товарами как однородными активами, обеспечивая ликвидность рынка, прозрачное ценообразование и возможность хеджирования.

Ключевые биржи (CBOT, NYMEX, ICE, Московская биржа) выступают организаторами торгов, а клиринговые палаты гарантируют исполнение сделок, превращая сырье в финансовый инструмент с глобальными эталонными ценами. При масштабировании торгов щебнем необходимо учесть данный опыт.

Результаты и обсуждение

В России щебень широко применяется в различных отраслях строительства, и на него существует значительное количество ГОСТов и нормативов, регулирующих их применение. Однако для удобства выбора потребителем на бирже его можно классифицировать на несколько основных товарных марок, каждая из которых соответствует конкретным требованиям и сферам использования. На основе действующих стандартов и нормативов можно предложить следующую классификацию.

Наиболее востребованным для строительства федеральных трасс и ответственных объектов является щебень «Дорожный премиум». Он обладает высокой прочностью (M1200-M1400), кубовидной формой зерен (I группа лещадности) и повышенной морозостойкостью (F300-F400). Такой щебень, как правило, гранитный или габбро-диабазовый, фракцией 20–40 мм, идеально

подходит для устройства оснований автомагистралей, аэродромных покрытий и мостовых конструкций, где требуются максимальная устойчивость к нагрузкам и долговечность.

Для региональных дорог и асфальтобетонных смесей чаще применяют щебень «Дорожный стандарт» марки М800-М1200 с лещадностью I–II группы и морозостойкостью F200-F300. Его производят в тех же фракциях (20–40 мм, 5–20 мм), но он может быть не только гранитным, но и из прочных известняков, что делает его более доступным по цене при сохранении достаточных эксплуатационных качеств.

В производстве бетонных конструкций и железобетонных изделий незаменим щебень «Бетонный». Его ключевые особенности – кубовидная форма зерен (I группа) и прочность М800-М1200, что обеспечивает плотное сцепление в бетонной смеси. Фракция 5–20 мм оптимальна для изготовления плит перекрытий, колонн и других ответственных элементов зданий.

Для малоэтажного строительства и общестроительных работ хорошо подходит щебень «Строительный универсал» марки М600-М800. Обладая лещадностью II группы и морозостойкостью F100-F200, он применяется в фундаментах, отсыпке площадок и дренажных системах. Этот вид щебня, как правило, известняковый или доломитовый, предлагает хорошее сочетание качества и экономичности.

В железнодорожном строительстве востребован щебень «Балластный» (М400-М600, III–IV группа лещадности), который благодаря фракции 40–70 мм отлично подходит для балластного слоя путей. Его более низкая прочность и морозостойкость (F50-F100) компенсируются высокой устойчивостью к динамическим нагрузкам.

Наконец, для дренажных систем и ландшафтных работ используют щебень «Дренажный» (М300-М600, III–IV группа) фракцией 20–70 мм. Его основная задача – обеспечение фильтрации, поэтому требования к прочности и морозостойкости здесь минимальны.

Такая классификация по товарным маркам упрощает процесс выбора материала, делая его более интуитивно понятным для покупателей, и помогает производителям четко позиционировать свою продукцию на рынке. Стандартизированные названия, отражающие ключевые свойства и назначение щебня, способствуют прозрачности сделок и повышают доверие между поставщиками и потребителями.

Несмотря на озвученные ранее проблемы с экспортом и импортом, их можно стараться нивелировать осуществлением международной кооперации через биржу. При этом для иностранных участников возможны льготы и упрощенные процедуры, что объясняется большим объемом необходимой для них документации.

Еще одной категорией потенциальных участников биржевых торгов являются компании, выполняющие крупные инфраструктурные и прочие строительные проекты. Например, одним из обязательных условий для участия в тендере на осуществление упомянутых ранее проектов может являться доля материалов, закупленных на товарной бирже.

Однако в случае компаний, добывающих строительные материалы, потенциальные налоговые выгоды в масштабах государства могут быть не такими значительными. При этом есть такие отрасли, где налогообложение

с учетом биржевых цен на товар целесообразно. В первую очередь это нефть и газ, и биржевые цены должны влиять на начисление налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ) по этим товарам.

На данный момент при расчете НДПИ на нефть учитывается ее стоимость в портах стран Европейского союза (ЕС). Насколько цены, полученные в странах, где официально купить российские ресурсы проблематично, реальны, остается только догадываться, однако на данный момент очевидно, что ключевым потребителем наших энергоресурсов стали страны Азии, поэтому и данные, используемые в расчетах, должны быть скорректированы.

Основной метод корректировки – введение российского бенчмарка, благодаря которому сумма взимаемого налога будет рассчитываться исходя из стоимости нефти, согласно заключенному контракту. Первый способ обеспечения сбора информации заключается в агрегации данных об отпускных ценах из крупнейших российских нефтеналивных портов, таких как, например, Усть-Луга.

Другой способ опять будет заключаться в использовании инфраструктур товарных бирж, таких как Санкт-Петербургская международная товарно-сырьевая биржа. Однако в таком случае существуют серьезные опасения относительно желаний прохождения регистрации покупателей российского сырья, особенно для тех, кто покупает российскую нефть в обход санкций.

Тем не менее те же товарные биржи могут рассчитывать среднюю стоимость отгруженной нефти исходя из данных, полученных от администрации порта. Такая средняя цена может обоснованно лечь в качестве бенчмарка при расчетах НДПИ и обеспечит куда более реалистичное отражение рыночной конъюнктуры.

Ситуация с газом при этом сложнее. Сжиженный природный газ может облагаться налогом по схожей с нефтью схеме, так как его продажа предусматривает отгрузку на корабли, при этом с трубопроводным газом подобный механизм невозможен.

Средние цены на газ также снижаются из-за учета долгосрочных контрактов, в то время как спотовые цены (особенно в ЕС) будут куда выше. В России же спотовый рынок газа не существует, цены в контрактах на его поставку определяются в ходе прямых переговоров между компаниями, что также не способствует применению «традиционной» для данной работы схемы.

Запуск биржевых торгов щебнем на Восточной товарной бирже открывает новые перспективы для развития рынка строительных материалов в России. Этот шаг создает основу для формирования прозрачного и эффективного механизма ценообразования, что особенно важно для отрасли, традиционно считающейся одной из наиболее проблемных с точки зрения коррупционных рисков.

Заключение

Основное преимущество новой системы заключается в создании единого ценового ориентира, который может использоваться как участниками рынка, так и контролирующими органами. Уже первые результаты торгов показывают, что биржевые цены на щебень (в районе 1100 руб. за тонну) достаточно точно отражают реальную рыночную ситуацию, что подтверждается

анализом предложений от производителей. Это позволяет надеяться, что в перспективе биржа сможет стать надежным источником ценовых индикаторов для налоговых органов при проверке обоснованности цен в контрактах.

Особенно важно, что развитие биржевой торговли создает предпосылки для стандартизации качества строительных материалов. Опыт международных товарных бирж показывает, что успешная торговля возможна только при четком определении характеристик товара. В случае со щебнем это означает необходимость разработки понятной классификации по маркам прочности, лещадности и другим ключевым параметрам, что в конечном итоге пойдет на пользу как производителям, так и потребителям.

Перспективы развития системы включают несколько важных направлений. Во-первых, это расширение перечня торгуемых материалов – вслед за щебнем на биржу могут выйти песок, цемент и другие строительные материалы. Во-вторых, важным шагом станет развитие региональных торговых площадок, которые позволят учитывать особенности местных рынков и минимизировать влияние транспортных издержек на конечную цену. В-третьих, особое значение имеет интеграция биржевых механизмов с системой госзакупок, что может стать мощным стимулом для перехода отрасли на прозрачные принципы работы.

Несмотря на существующие вызовы, такие как необходимость адаптации участников рынка к новым условиям и развитие соответствующей инфраструктуры, запуск биржевых торгов строительными материалами следует рассматривать как важный этап модернизации всей строительной отрасли. Опыт других стран убедительно демонстрирует, что биржевые механизмы торговли способствуют повышению эффективности рынка, снижению коррупционных рисков и созданию справедливых условий конкуренции. В долгосрочной перспективе это должно привести к оздоровлению отрасли и повышению ее инвестиционной привлекательности.

Список литературы

1. Кривокоченко Л. В. Современные особенности товарной биржи // Российский внешнеэкономический вестник. 2019. № 5. С. 41–53.
2. Рогулин Р. С. Управление ценовой политикой лесопромышленного предприятия с учетом проблем формирования цепей поставок сырья и расчета объемов производства // Бизнес-информатика. 2024. № 4. С. 98–111. doi: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111
3. Бадеева Е. А., Малахова Ю. В., Тарасов М. Ю., Барбашова С. А. Макро- и микро-экономические последствия преодоления пандемии COVID-19 для российской экономики // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 2 (38). С. 5–29. doi: 10.21685/2227-8486-2021-2-1
4. Рогулин Р. С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14, № 4. С. 19–35. doi: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35
5. Петрова Л. А., Бадеева Е. А., Малахова Ю. В. Конвергенция ключевых цифровых технологий в бизнес-практике // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. 2024. № 2. С. 31–52. doi: 10.24412/2071-6435-2024-2-31-52
6. Малкина М. Ю. Заражение на рынках сырьевых товаров в период финансового стресса // Финансы: теория и практика. 2023. № 28 (3). С. 194–205. doi: 10.26794/2587-5671-2023-28-3-194-205

7. Майоров С. И. Автоматический маркет-мейкер – альтернатива традиционным биржевым моделям? // Экономическая политика. 2022. Т. 17, № 6. С. 112–139. doi: 10.18288/1994-5124-2022-6-112-139
8. Коробов А. А. Специфика формирования биржевых цен на нефть в периоды эскалации напряженности на Ближнем и Среднем Востоке // Среднерусский вестник общественных наук. 2020. Т. 15, № 1. С. 221–241. doi: 10.22394/2071-2367-2020-15-1-221-241
9. В России запустили торги щебнем на бирже. URL: <https://www.rbc.ru/> (дата обращения: 05.05.2025).
10. Танина Н. А., Малахова Ю. В. Предотвращение уклонения от налогообложения: современные тенденции, проблемы, перспективы // Управление реформированием социально-экономического развития предприятий, отраслей, регионов : сб. науч. ст. по материалам XIII Междунар. науч.-практ. конф. преподавателей, аспирантов, студентов и практиков, посвящ. 65-летию Пензенского филиала Финансового университета при Правительстве РФ (Пенза, 11 ноября 2022 г.) / под ред. В. В. Бондаренко, Е. В. Восейкова, М. А. Таниной, В. А. Юдиной. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 43–46.
11. Восточная биржа начала торговать щебнем. URL: <https://www.rbc.ru/> (дата обращения: 05.05.2025).
12. Балахонова Е. В., Мещерякова О. В., Сюй Дэ-хун. К вопросу о роли экспортных и экспортно-импортных хабов в развитии межгосударственных торговых отношений и транспортно-логистических связей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 3. С. 5–24. doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-1

References

1. Krivokochenko L.V. Modern features of the commodity exchange. *Rossiiskij vneshneekonomicheskij vestnik = Russian Foreign Economic Bulletin*. 2019;(5):41–53. (In Russ.)
2. Rogulin R.S. Management of the pricing policy of a timber industry enterprise, taking into account the problems of forming supply chains of raw materials and calculating production volumes. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2024;(4):98–11. (In Russ). doi: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111
3. Badeeva E.A., Malakhova Yu.V., Tarasov M.Yu., Barbashova S.A. Macro- and micro-economic consequences of overcoming the COVID-19 pandemic for the Russian economy. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2021;(2):5–29. (In Russ). doi: 10.21685/2227-8486-2021-2-1
4. Rogulin R.S. A model for optimizing the procurement plan for raw materials from the regions of Russia by a processing complex. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2020;14(4):19–35. (In Russ.). doi: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35
5. Petrova L.A., Badeeva E.A., Malakhova Yu.V. Convergence of key digital technologies in business practice. *ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika = STAGE: economic theory, analysis, practice*. 2024;(2):31–52. (In Russ). doi: 10.24412/2071-6435-2024-2-31-52
6. Malkina M.Y. Infection in the commodity markets during the period of financial stress. *Finansy: teoriya i praktika = Finance: theory and practice*. 2023;(28):194–205. (In Russ). doi: 10.26794/2587-5671-2023-28-3-194-205
7. Mayorov S.I. Is an automatic market maker an alternative to traditional stock exchange models? *Ekonomicheskaya politika = Economic policy*. 2022;17(6):112–139. (In Russ). doi: 10.18288/1994-5124-2022-6-112-139

8. Korobov A.A. Specifics of the formation of stock prices for oil during periods of escalation of tension in the Near and Middle East. *Srednerusskij vestnik obshchestvennyh nauk = Central Russian Bulletin of Social Sciences*. 2020;15(1):221–241. (In Russ). doi: 10.22394/2071-2367-2020-15-1-221-241
9. *V Rossii zapustili torgi shchebnem na birzhe = In Russia, rubble trading was launched on the stock exchange*. (In Russ). Available at: <https://www.rbc.ru/> (accessed 05.05.2025).
10. Tanina N.A., Malakhova Yu.V. Prevention of tax evasion: current trends, problems, prospects. *Upravlenie reformirovaniem social'no-ekonomicheskogo razvitiya predpriya-tij, otraslej, regionov: sb. nauch. st. po materialam XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. prepodavatelej, aspirantov, studentov i praktikov, posvyashch. 65-letiyu Penzenskogo filiala Finansovogo universiteta pri Pravitel'stve RF (Penza, 11 noyabrya 2022 g.) = Management of the reform of socio-economic development of enterprises, industries, regions: collection of scientific articles based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference of Teachers, graduate students, undergraduates and practitioners, dedicated to To the 65th anniversary of the Penza Branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation (Penza, November 11, 2022)*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:43–46. (In Russ)
11. *Vostochnaya birzha nachala torgovat' shchebnem = The Eastern Stock Exchange has started trading rubble*. (In Russ). Available at: <https://www.rbc.ru/> (accessed 05.05.2025).
12. Balakhonova E.V., Meshcheryakova O.V., Xu De-hong On the role of export and export-import hubs in the development of interstate trade relations and transport and logistics links. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2022;(3):5–24. (In Russ). doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-1

Информация об авторах / Information about the authors

Юлия Владимировна Малахова

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

Yuliya V. Malakhova

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

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры экономики
и финансов,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Elena A. Badeeva

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

Денис Александрович Булдыгин

студент,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: b2004den@gmail.com

Denis A. Buldygin

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

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

Поступила в редакцию/Received 10.05.2025

Поступила после рецензирования/Revised 02.06.2025

Принята к публикации/Accepted 03.06.2025

О НЕКОТОРЫХ ФОРМАХ ВЛИЯНИЯ НА КРИЗИСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭКОНОМИКЕ РЕГИОНОВ

**В. М. Володин¹, Н. В. Володина²,
Л. В. Рожкова³, И. А. Питайкина⁴**

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

²Почта России, Москва, Россия

¹volodin@mail.ru, ²nadinvv@mail.ru, ³mamaeva_lv@mail.ru, ⁴persey_@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В последнее время усиливается влияние ценовых колебаний на социально-экономическую устойчивость субъектов Российской Федерации, особенно в условиях глобальной турбулентности и санкционного давления. Целью исследования стало выявление механизмов, способных смягчить инфляционное давление и стабилизировать экономику регионов. *Материалы и методы.* В работе используется комплексный подход, сочетающий элементы экономического анализа, исторических параллелей и критического осмысления современных мер регулирования. *Результаты.* Проведен анализ влияния инфляции на ключевые сектора региональной экономики, рассмотрены примеры прошлого (в том числе 1990-х гг.) и дана оценка инструментов антикризисного реагирования на уровне субъектов. Особое внимание уделено региональной специфике: различиям в структуре экономики, уровне зависимости от центра, социальной чувствительности населения. *Выводы.* Эффективность влияния на кризисные процессы во многом зависит от согласованности фискальной и социальной политики, открытости регионов к инновациям и гибкости административных решений. Данные исследования могут быть полезны для разработчиков антикризисных стратегий, органов управления и научного сообщества, исследующего механизмы устойчивости регионов в условиях инфляционных шоков.

Ключевые слова: инфляция, региональная экономика, перегретая экономика, государственное влияние, монетарная политика, экономика регионов, антикризисная политика, займы, Центральный банк

Для цитирования: Володин В. М., Володина Н. В., Рожкова Л. В., Питайкина И. А. О некоторых формах влияния на кризисные процессы в экономике регионов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 34–45. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-3

SOME FORMS OF INFLUENCE ON CRISIS PROCESSES IN REGIONAL ECONOMIES

**V.M. Volodin¹, N.V. Volodina²,
L.V. Rozhkova³, I.A. Pitaikina⁴**

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

²Russian Post, Moscow, Russia

¹volodin@mail.ru, ²nadinvv@mail.ru, ³mamaeva_lv@mail.ru, ⁴persey_@bk.ru

Abstract. *Background.* In recent years, price fluctuations have increasingly affected the socio-economic stability of the constituent entities of the Russian Federation, especially under conditions of global turbulence and sanctions pressure. The aim of the study is to identify mechanisms capable of mitigating inflationary pressure and stabilizing regional economies. *Materials and methods.* The study employs an integrated approach combining economic analysis, historical parallels, and critical evaluation of current regulatory measures. *Results.* The paper analyzes the impact of inflation on key sectors of regional economies, examines historical examples (including those from the 1990s), and assesses anti-crisis tools applied at the regional level. Special attention is paid to regional specifics, such as differences in economic structure, dependency on the federal center, and the population's social sensitivity. *Conclusions.* The effectiveness of responses to crisis processes largely depends on the coherence of fiscal and social policies, regional openness to innovation, and the flexibility of administrative decision-making. The article may be of interest to anti-crisis strategy developers, public administration bodies, and scholars studying regional resilience mechanisms under inflationary shocks.

Keywords: inflation, regional economy, overheated economy, government intervention, monetary policy, regional development, anti-crisis policy, loans, Central Bank

For citation: Volodin V.M., Volodina N.V., Rozhkova L.V., Pitaikina I.A. Some forms of influence on crisis processes in regional economies. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):34–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-3

Введение

В настоящее время в бизнес-сообществе, научных кругах и широкой общественности активно разворачивается многослойная, а порой и полемическая дискуссия относительно роли Центрального банка Российской Федерации в преодолении инфляционных процессов [1–8]. Эти споры – не просто дань конъюнктуре, они свидетельствуют о возрастающем внимании к системным основам экономического регулирования. Казалось бы, логика действий давно отработана: при росте инфляции регулятор поднимает ключевую ставку, денежное предложение сокращается, экономика «остужается». Все как по учебнику. Однако жизнь, как это не раз бывало в истории, выдвигает перед нами более сложные, многогранные и далеко не однозначные задачи. В этих условиях особенно важно не только анализировать уже принятые меры, но и формулировать новые взгляды, предлагать дополнительные подходы, расширяющие рамки привычных экономических схем.

Сегодня экономика страны сталкивается с серьезнейшими вызовами, одновременно носящими внешний и внутренний характер. На этом фоне наблюдается парадоксальная ситуация: высокая инфляция сочетается с низкой безработицей. Возникает вполне объяснимое ощущение перегрева: когда рост денежной массы не сопровождается эквивалентным увеличением выпуска, и напряжение в системе нарастает. В научной среде, к слову, давно укоренилась мысль о том, что ликвидировать инфляцию полностью невозможно. Речь может идти лишь о ее «окультуривании» – переводе в управляемое, прогнозируемое и относительно умеренное русло. Такая инфляция, по сути, становится частью экономической нормы и позволяет системе сохранять подвижность.

Однако, на наш взгляд, не только макроэкономический уровень должен становиться ареной борьбы с инфляционными угрозами. Не менее значим вклад самих хозяйствующих субъектов: предприятий, производственных кластеров, региональных экономик. Практика показывает: ждать, пока «наверху»

все решат, – стратегия не просто пассивная, но порой и разрушительная. Необходимо переходить к действиям: анализировать свои издержки, пересматривать модели закупок, осваивать альтернативные логистические каналы. В условиях инфляции выигрывает не тот, кто умеет выживать, а тот, кто умеет адаптироваться.

Собственно, сама инфляция – это не абстрактное понятие, а вполне конкретное экономическое явление, выражающееся в устойчивом росте общего уровня цен на товары и услуги. Это явление негативно сказывается как на покупательной способности населения, так и на себестоимости продукции и, следовательно, на конкурентоспособности бизнеса. В экономической теории принято выделять несколько разновидностей инфляции: инфляцию спроса, инфляцию предложения и структурную инфляцию. Первая возникает при превышении совокупного спроса над производственными возможностями, вторая – в результате удорожания факторов производства, третья же обусловлена нарушениями в экономической структуре, логистическими сбоями и отраслевыми диспропорциями.

Особый интерес представляет региональный срез инфляционных процессов. Так, в сырьевых регионах наиболее остро проявляется инфляция предложения – малейшие колебания на мировых рынках приводят к росту внутренних издержек. В то же время на отдаленных, слабо интегрированных в национальные товарные сети территориях доминируют эффекты логистической инфляции и ценовых монополий, когда ограниченность конкуренции приводит к завышению цен.

Неслучайно инфляция спроса зачастую иллюстрируется хрестоматийной фразой: «Слишком много денег охотится за слишком малым количеством товаров». Эта формула подчеркивает главный дисбаланс: когда совокупный спрос резко увеличивается, а предложение остается прежним, неизбежно происходит рост цен. При этом если производственные мощности уже загружены полностью, то бизнес не может оперативно отреагировать ростом выпуска. Таким образом, при формировании антикризисной политики правительство оказывается перед выбором: либо допустить рост безработицы, сдерживая инфляцию, либо допустить рост инфляции, обеспечивая занятость. По сути, идет поиск наименее разрушительного из двух зол.

Именно поэтому так важно рассматривать инфляционные процессы не только в контексте макрорегулирования, но и с позиции конкретных экономических агентов, которые в состоянии – при наличии инициативы и соответствующих инструментов – внести вклад в стабилизацию. Предприятия, регионы, отрасли – все это не пассивные получатели «вертикальных» решений, а активные участники экономической динамики, способные влиять на свою среду. В этом главная идея предлагаемого исследования – соединить теоретическое осмысление с практическими выводами, показать возможности влияния на инфляционные процессы на уровне региональной экономики и хозяйствующих субъектов.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили положения теории макроэкономического регулирования, включая кейнсианский и неоклассический подходы. Используются методы системного анализа, историко-логического сравнения, а также элементы факторного анализа и дескриптивной статистики.

В качестве эмпирической базы исследования использованы данные Федеральной службы государственной статистики России (Росстат) по индексу потребительских цен (CPI) и уровню безработицы (по методологии Международной организации труда), а также отчеты Центрального банка Российской Федерации по инфляции и денежно-кредитной политике. Для исторического обзора применены архивные материалы Росстата о динамике цен и безработицы. Визуализация данных выполнена посредством табличных форм построения динамики ключевых макропоказателей.

Результаты и обсуждение

Анализ инфляции как ключевого фактора кризисных процессов в региональной экономике требует всестороннего подхода, включающего как макроэкономические, так и региональные параметры. В период 2020–2023 гг. в России наблюдалась устойчивая отрицательная корреляция между индексом потребительских цен (ИПЦ) и уровнем безработицы. Так, пик инфляции в 2022 г. (11,94 %) совпал с минимальным уровнем безработицы (3,87 %). Эта взаимосвязь подтверждает гипотезу об обратной зависимости между инфляционным давлением и занятостью в краткосрочном периоде, что согласуется с кривой Филлипса, адаптированной для современных условий российской экономики.

Причинами подобного «перегрева» экономической активности выступили комплексные факторы: снятие карантинных ограничений после пандемии COVID-19, эффект отложенного спроса, резкое расширение государственных расходов, а также внешнеэкономические шоки, включая санкционное давление и разрывы логистических цепочек. В условиях, когда совокупный спрос опережает восстановление предложения, особенно в отраслях с длинным циклом воспроизводства, ценовые искажения становятся системными. Здесь важно отметить, что подобная ситуация наблюдалась и в других странах, но в российском контексте она усугублялась ограниченной доступностью импортных технологий и комплектующих, что провоцировало рост цен даже при стабильном внутреннем спросе.

В 2023 г. инфляция снизилась до 7,42 % на фоне жесткой монетарной политики Центрального банка и ограничения бюджетных расходов. Несмотря на это, уровень безработицы продолжил снижаться, достигнув 3,33 %. Такая динамика указывает на сохраняющийся высокий уровень экономической активности в условиях умеренного ценового роста. Подобное расхождение между традиционными показателями может указывать на инерционный характер инфляции, ее чувствительность к нерыночным факторам и возможную отложенную реакцию на снижение потребительского спроса. В этой связи возрастает значение структурных изменений на рынке труда: автоматизация, изменение модели занятости, рост самозанятости – все это влияет на инфляционные ожидания и деформацию классических моделей ценообразования.

Следует отметить, что значительная часть инфляции в 2023 г. носила характер инфляции издержек: рост цен был связан с увеличением себестоимости продукции, особенно в логистике и энергетике. Монополизация отдельных отраслей только усугубила эту тенденцию. Системная проверка структуры ценообразования остается слабым звеном в антикризисной политике регионов.

Региональный анализ позволяет выявить значительные различия в структуре и интенсивности кризисных явлений. Так, в Центральном и Северо-Западном федеральных округах инфляция не превышала 7 %, а уровень безработицы держался ниже 4 %. Эти округа демонстрируют устойчивость к шокам за счет развитой инфраструктуры, диверсифицированной экономики и концентрации высокотехнологичных отраслей. Указанные регионы, обладая более высокой плотностью капитала и квалифицированного труда, легче адаптируются к внешним изменениям, компенсируя локальные инфляционные давления за счет высокой производительности.

В противоположность этому Северо-Кавказский округ характеризовался инфляцией выше 10 % и безработицей свыше 12 %, что связано с низкой диверсификацией, слабой логистической связностью и ограниченной производственной базой. Дальневосточный, Сибирский и Северо-Кавказский округа в 2023 г. показали превышение локального ИПЦ по сравнению со среднероссийским уровнем (Южный округ в меньшей степени) (табл. 1). Основные причины – высокая стоимость доставки товаров, монополизация логистических услуг и удаленность от ключевых производственных и потребительских центров. Однако в 2024 г. за счет мер кредитно-денежной политики Центробанка ситуация изменилась в лучшую сторону, что позволило говорить о снижении ключевой ставки в июне текущего года на 1 процентный пункт.

Таблица 1

Отклонение ИПЦ по федеральным округам
от общероссийского уровня за период 2020–2024 гг.¹

Федеральный округ	Отклонение от среднего ИПЦ (в п.п.)				
	2020	2021	2022	2023	2024
Центральный	–0,21	–0,07	0,52	–0,01	0,40
Южный	–0,24	0,42	–0,21	0,28	–0,24
Северо-Западный	–0,07	0,14	–0,04	–0,31	–0,26
Дальневосточный	0,08	–1,24	–0,14	0,87	–0,86
Сибирский	–0,17	0,71	0,26	0,62	–0,01
Уральский	–0,70	–1,36	–2,00	–1,06	–0,69
Приволжский	0,36	0,22	–0,01	–0,23	0,02
Северо-Кавказский	1,15	1,36	–0,32	0,69	–1,76

¹ Инфляция: индекс потребительских цен на товары и услуги в 2020–2024 гг. по регио-нам. URL: https://www.audit-it.ru/inform/inflation/inflation_regions.php (дата обращения: 23.05.2025).

Данные таблицы подтверждают, что региональные особенности инфляции обусловлены не только внутренними факторами спроса, но и внешними ограничениями, включая инфраструктурные барьеры, логистические издержки, доступность сырья и конкурентную среду. Например, в Сибирском и Дальневосточном округах логистические надбавки в розничной торговле составляют до 12–15 % от конечной цены товара, тогда как в Центральном округе эти издержки не превышают 5–6 %.

Наиболее эффективные меры по снижению инфляционного давления были реализованы в Приволжском федеральном округе. В 2022–2023 гг. здесь применялась комбинированная модель регулирования: субсидирование логистики, ограничение торговых надбавок на социально значимые продукты до 7 %, а также активная поддержка малого и среднего бизнеса. Это позволило удержать инфляцию ниже среднероссийского уровня даже в условиях общего роста цен. В то же время в Северо-Кавказском округе эпизодические меры – такие как компенсации на отдельные продукты – оказались неэффективными в силу отсутствия системных подходов к стимулированию занятости, развитию инфраструктуры и формированию устойчивой деловой среды.

Современные антикризисные стратегии в ряде субъектов федерации предполагают не только контроль над ценами, но и меры по стимулированию предложения: субсидии для производителей, льготное кредитование, создание промышленных кластеров и программы переквалификации для населения. Кроме того, распространенной практикой стало введение предельных торговых надбавок на основные продукты питания и услуги, а также стимулирование внутреннего производства в рамках политики импортозамещения.

Отдельного внимания заслуживает связь между уровнем заработной платы, занятостью и инфляцией. С повышением зарплаты занятость растет, а безработица снижается. Но повышение зарплаты означает рост издержек, а следовательно, и цен. Чем выше безработица, тем меньше прирост денежной зарплаты, тем ниже рост цен, и наоборот, чем ниже безработица и выше занятость, тем больше прирост денежной заработной платы, тем выше темп роста цен. Это циклическое взаимодействие требует чувствительной настройки фискальных и монетарных регуляторов.

В условиях перегретой экономики и высокой ключевой ставки (21 %) первоочередной задачей становится нормализация экономических отношений. Когда рост цен связан с изменением калькуляции затрат, необходим постатейный анализ, но зачастую можно наблюдать примеры ничем не обоснованного монопольного роста цен. Например, если тариф врача в платной поликлинике вырос с 600 до 2500 руб. при том же качестве и длительности приема, то подобный рост не может быть объяснен затратной составляющей и указывает на инфляционный спекулятивный механизм. Усиление роли частного сектора в условиях нехватки доступных услуг в государственных учреждениях усиливает этот тренд.

Подобные случаи выявляются также в сфере платных парковок, где тарифы выросли на 60–70 % без объективного изменения в качестве или структуре обслуживания. Это указывает на отсутствие эффективного антимонопольного контроля. Данные примеры свидетельствуют о росте цен на всех уровнях, что требует не только вмешательства Центрального банка, но и более активной роли Государственной Думы, ФАС и прокуратуры.

Таким образом, на региональном уровне анализ калькулирования затрат при росте цен не проводится должным образом. Это является упущением в реализации антиинфляционной политики, требующим системной коррекции. Здесь можно вспомнить старую истину: невозможно лечить болезнь, не зная ее причины. Отсутствие анализа себестоимости и элементного состава цен формирует основу для необоснованного роста, особенно в сферах с ограниченной конкуренцией.

Исторический опыт также подтверждает эффективность сочетания жесткой монетарной и гибкой фискальной политики. Так, в период Великой Отечественной войны, несмотря на инфляцию до 60 %, государство активно регулировало цены и налогообложение, вводя ограничения на выдачу ссуд и изъятие сбережений. Особо стоит отметить деятельность наркома финансов А. Г. Зверева, который обеспечил стабилизацию финансовой системы в тяжелых условиях войны. Вместо включения «денежного станка» он применил комплекс ограничительных и мобилизационных мер, что позволило избежать гиперинфляции, несмотря на огромные военные расходы. Первое, что он сделал уже на второй день войны, – это запретил выдачу ссуд. Кроме того, не разрешалось единовременно снимать со сберкнижек сумму, превышающую 200 руб. Что же касается рабочих и служащих, то они лишились отпускных. Нет, эти деньги им, конечно же, начисляли, но выплата откладывалась на потом – на «время после войны».

Далее нарком финансов прибег к испытанному столетиями способу: он повысил уже имеющиеся в стране налоги и ввел новые: военный, а также на холостяков, одиноких и бездетных. Это позволило пополнить государственную казну только в одном 1945 г. почти на 40 млрд руб. Но и этого было недостаточно. Можно было бы просто включить денежный станок и напечатать недостающие средства, но это неизбежно привело к немалой инфляции, а в перспективе и к обвалу всей экономики страны. 1 августа 1941 г. был создан Фонд обороны. Туда советские граждане, желая внести свой вклад в дело победы над врагом, могли перечислять пожертвования на любую посильную для них сумму. Причем не только в деньгах, но и, если было желание и возможность, в драгметаллах. Это принесло в бюджет еще почти 18 млрд наличных денег, не считая золота, серебра, платины и драгоценностей, общая сумма которых – около 1,7 млрд руб., что в сумме составило почти 20 млрд руб. [9].

Эти уроки истории важны и сегодня. Применение структурных изменений в системе образования, стимулирование автоматизации и развитие инфраструктурных кластеров могут стать современными аналогами мобилизационных решений прошлого. Своевременная адаптация таких подходов способна ослабить инфляционное давление и повысить устойчивость экономики регионов. От этого выигрывают все: и бизнес, и потребитель, и государство.

Проблемы и перспективы

Несмотря на предпринимаемые усилия по сдерживанию инфляции и стимулированию занятости, региональные экономики России сталкиваются с рядом устойчивых и системных проблем, усугубляющих кризисные явления и ограничивающих эффективность антикризисных мер [10–16]. Эти проблемы носят не только экономический, но и институциональный, инфраструктурный

и демографический характер, формируя сложную совокупность факторов, взаимно усиливающих друг друга и затрудняющих реализацию даже самых выверенных стратегий.

Одной из ключевых трудностей остается ограниченность фискальных ресурсов субъектов федерации. В условиях высокой нагрузки на региональные бюджеты и ограниченного доступа к источникам заимствования большинство субъектов не располагают достаточными средствами для активного участия в антикризисных программах. Недостаточные бюджетные возможности не позволяют региональным властям в полном объеме компенсировать возрастающие издержки, связанные с транспортировкой, снабжением и производством, особенно в условиях инфляционного давления и росте цен на энергоносители, материалы и услуги. Это особенно заметно в малых и дотационных регионах, где бюджетная политика сводится к обслуживанию обязательств и поддержанию социальной стабильности в ущерб инвестициям в развитие.

Дополнительным дестабилизирующим фактором выступает дефицит квалифицированной рабочей силы, особенно в отдаленных и промышленно ориентированных регионах, где спрос на трудовые ресурсы стабильно превышает предложение. Причинами выступают как демографический спад и отток молодежи, так и недостаточная привлекательность регионов для внутренней миграции. Работодатели, стремясь привлечь и удержать трудовые ресурсы, вынуждены предлагать завышенные ставки заработной платы, зачастую не соответствующие фактической производительности труда. Это, в свою очередь, увеличивает себестоимость продукции, снижает конкурентоспособность регионального бизнеса и провоцирует инфляцию издержек. В результате возникает замкнутый цикл: инфляция стимулирует рост издержек, а рост издержек ускоряет инфляцию, особенно в секторах с высокой трудоемкостью: строительстве, ЖКХ, пищевой промышленности и транспорте.

Структура рынков торговли и логистики в ряде субъектов федерации характеризуется высокой степенью монополизации, что снижает уровень ценовой конкуренции и ограничивает возможности естественного торможения инфляции за счет рыночных механизмов. В отсутствие реальной конкуренции отдельные поставщики и логистические операторы могут диктовать условия, включая установление завышенных надбавок, особенно в состоянии нехватки инфраструктурных альтернатив и недостаточной прозрачности ценообразования. Монопольное или олигопольное положение усиливается также ограниченным присутствием крупных ритейлеров и слабым развитием кооперации среди малых производителей.

Инфраструктурные барьеры, особенно характерные для отдаленных и труднодоступных территорий Сибири, Дальнего Востока и Северного Кавказа, усугубляют существующую проблему. Недостаточное развитие транспортной и энергетической инфраструктуры способствует росту цен, замедляет товарооборот и ограничивает доступность социально значимых товаров. Физический износ транспортных сетей, высокий уровень зависимости от автомобильных перевозок и отсутствие цифровизации логистических маршрутов увеличивают расходы бизнеса и формируют территориальную дифференциацию инфляционного давления. В этих условиях даже временные перебои в поставках могут вызывать резкий рост цен на местных рынках, отражаясь на уровне жизни населения.

Для преодоления этих вызовов и обеспечения устойчивости региональной экономики в условиях инфляции необходимо проведение комплекса институциональных и бюджетных реформ. Перспективным направлением является создание региональных «антиперегревочных фондов», аккумулирующих средства, предназначенные для оперативного вмешательства при резких колебаниях цен. Такие фонды могут формироваться за счет федеральных субсидий, налоговых резервов и целевых отчислений с экономически активных отраслей. В кризисные периоды они способны выполнять роль стабилизатора, позволяя временно субсидировать продовольствие, энергетические ресурсы и транспортные издержки, особенно в зонах повышенного риска и высокой социальной уязвимости.

Не менее важным является совершенствование системы межбюджетных трансфертов. Привязка объемов финансовой поддержки регионов к динамике инфляции, уровню безработицы и степени отраслевой уязвимости позволит более точно и своевременно реагировать на экономические шоки. Такая модель распределения ресурсов обеспечит гибкость бюджетной политики и повысит справедливость перераспределения средств в федеративной системе. При этом важны прозрачность критериев распределения и учет региональных стратегий развития, чтобы стимулировать инициативу и эффективность на местах.

Развитие цифровой логистики, включая внедрение платформенных решений для управления потоками грузов, мониторинга цепочек поставок и анализа затрат, позволит существенно снизить логистические издержки. Такие цифровые инструменты способствуют повышению прозрачности, сокращению простоев и оптимизации маршрутов доставки. В сочетании с модернизацией транспортной инфраструктуры (в том числе путем государственно-частного партнерства) это создает потенциал для устойчивого снижения региональных инфляционных различий и более равномерного распределения экономической активности.

Отдельного внимания требует проблема кадрового дефицита, усугубляющего структурную инфляцию. Программы дуального образования, реализуемые в сотрудничестве с предприятиями, могут обеспечить целенаправленную подготовку специалистов под конкретные отраслевые нужды. По примеру Италии после двух лет очного обучения можно ввести год практики на производстве с возможностью перевода на заочную форму в последующий период. Важным дополнением должны стать меры государственной поддержки молодых специалистов, включая льготное налогообложение, жилищные субсидии, предоставление грантов на переезд и обустройство. Эти шаги не только повысят приток квалифицированной рабочей силы, но и снизят необходимость чрезмерного стимулирования работников премиями и доплатами, уменьшая давление на фонд оплаты труда.

Таким образом, перспективы устойчивого экономического развития регионов в условиях инфляционного давления напрямую зависят от способности интегрировать антикризисные меры в долгосрочную стратегию структурной перестройки. Только комплексный подход, учитывающий особенности территориального устройства, состояние инфраструктуры, структуру занятости и характер рыночных взаимодействий, позволит обеспечить сбалансированное соотношение между ценовой стабильностью и поддержкой деловой активности.

Преодоление инфляционных ловушек в регионах невозможно без диалога между центром и субъектами федерации, повышения прозрачности институциональной среды и укрепления доверия к мерам государственной политики.

Заключение

Инфляция является сильным катализатором кризисных процессов в региональных экономиках, оказывая серьезное влияние на занятость и производство. В условиях прочной взаимосвязи спроса и предложения традиционные инструменты монетарного ужесточения центрального уровня должны дополняться активной региональной политикой: ценовым регулированием, стимулированием внутреннего производства и программами оптимизации занятости. Комплексная система мер, учитывающая финансовые возможности субъектов федерации, их социально-экономические особенности и транспортно-логистический потенциал, позволит достичь устойчивого баланса между сдерживанием инфляции и поддержкой экономического роста.

Список литературы

1. Абрамова М. А., Дубова С. Е., Диденко В. Ю. [и др.]. Об основных направлениях единой государственной денежно-кредитной политики на 2024 год и период 2025 и 2026 годов: мнение экспертов Финансового университета // Экономика. Налоги. Право. 2024. № 1. С. 6–22.
2. Безработица в регионах России. URL: <https://person-agency.ru/bezrabotica/po-regionam> (дата обращения: 20.02.2025).
3. Блохин А. А., Демидова С. Е., Мельникова Т. С. Назревшая трансформация разработки бюджетной политики в условиях растущей экономической динамики // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2024. № 4. С. 177–192.
4. Великороссов В. В., Коречков Ю. В., Неклюдов В. А. Инфляция: политэкономическая природа, причины и последствия // Теоретическая экономика. 2021. № 1. С. 11–18.
5. Гоник Г. Г., Андреева Е. А., Леухина Я. И., Рязанцева Я. С. Анализ уровня инфляции в системе российской экономики // Вестник Академии знаний. 2024. № 4. С. 442–447.
6. Гукасова Е. Р. Роль Центрального банка в борьбе с ростом инфляции: международный и российский опыт // Финансовые рынки и банки. 2022. № 4. С. 52–56.
7. Иванов А. В. Особенности обеспечения финансовой безопасности Российской Федерации в современных условиях // Вестник Московского университета МВД России. 2024. № 5. С. 212–217.
8. Коречков Ю. В., Кваша В. А., Мудревский А. Ю. Экономический рост и инфляция // Теоретическая экономика. 2025. № 2. С. 23–35.
9. Кто спас экономику СССР в годы ВОВ, и какую реальную цену в рублях заплатила наша страна за Победу в ней? URL: https://dzen.ru/a/ZINxxGKaCFXj3zWf?share_to=telegram (дата обращения: 20.02.2025).
10. Кузнецова В. В., Ларина О. И. Проблемы и перспективы реализации денежно-кредитной политики в России // ЭКО. 2022. № 12. С. 72–89.
11. Лисачкина Ю. С. Стратегия дефицита региональных бюджетов России // Вестник Академии знаний. 2022. № 6. С. 343–346.
12. Медведев И. Д., Солнцев О. Г. Денежно-кредитная политика банка России в условиях структурной трансформации экономики // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. № 2. С. 6–28.

13. Рашидова И. А., Рашидов О. И., Окорокров В. М. Монетарная политика как инструмент государственного регулирования экономики // Московский экономический журнал. 2021. № 6. С. 101–116.
14. Основные направления единой государственной денежно-кредитной политики на 2024 год и период 2025 и 2026 годов // Центральный банк РФ. URL: https://cbr.ru/about_br/publ/ondkp/on_2024_2026/ (дата обращения: 23.05.2025).
15. Чернов В. А. Проблема дефицита Федерального бюджета и налоговые механизмы ресурсного обеспечения развития экономики // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2024. № 2. С. 48–57.
16. Эриашвили Н. Д., Елизарова В. В. Инфляция и современная Россия // Вестник Московского университета МВД России. 2023. № 6. С. 287–291.

References

1. Abramova M.A., Dubova S.E., Didenko V.Yu. et al. On the main directions of the unified state monetary policy for 2024 and the period 2025 and 2026: the opinion of experts of the Financial University. *Ekonomika. Nalogi. Pravo = Economy. Taxes. Law*. 2024;(1):6–22. (In Russ)
2. *Bezrabotica v regionah Rossii = Unemployment in the regions of Russia*. (In Russ). Available at: <https://person-agency.ru/bezrabotica/po-regionam> (accessed 20.02.2025).
3. Blokhin A.A., Demidova S.E., Melnikova T.S. The overdue transformation of fiscal policy development in the context of growing economic dynamics. *Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz = Economic and social changes: facts, trends, forecast*. 2024;(4):177–192. (In Russ)
4. Velikorossov V.V., Korechkov Yu.V., Neklyudov V.A. Inflation: political and economic nature, causes and consequences. *Teoreticheskaya ekonomika = Theoretical economics*. 2021;(1):11–18. (In Russ)
5. Gonik G.G., Andreeva E.A., Leukhina Ya.I., Ryazantseva Ya.S. Analysis of the level of inflation in the Russian economic system. *Vestnik Akademii znaniy = Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024;(4):442–447. (In Russ)
6. Gukasova E.R. The role of the Central Bank in combating rising inflation: international and Russian experience. *Finansovye rynki i banki = Financial markets and banks*. 2022;(4):52–56. (In Russ)
7. Ivanov A.V. Features of ensuring financial security of the Russian Federation in modern conditions. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii = Bulletin of the Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2024;(5):212–217. (In Russ)
8. Korechkov Yu.V., Kvasha V.A., Mudrevskiy A.Y. Economic growth and inflation. *Teoreticheskaya ekonomika = Theoretical economics*. 2025;(2):23–35. (In Russ)
9. *Kto spas ekonomiku SSSR v gody VOV, i kakuyu real'nuyu cenu v rublyah zaplatila nasha strana za Pobedu v nej? = Who saved the economy of the USSR during the Second World War, and what real price did our country pay in rubles for Winning it?* (In Russ). Available at: https://dzen.ru/a/ZINxxGKaCFXj3zWf?share_to=telegram (accessed 20.02.2025).
10. Kuznetsova V.V., Larina O.I. Problems and prospects of monetary policy implementation in Russia. *EKO = ECO*. 2022;(12):72–89. (In Russ)
11. Lisachkina Yu.S. Strategy of deficit of regional budgets of Russia. *Vestnik Akademii znaniy = Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2022;(6):343–346. (In Russ)
12. Medvedev I.D., Solntsev O.G. Monetary policy of the Bank of Russia in the context of structural transformation of the economy. *Nauchnye trudy: Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya = Scientific papers: Institute of National Economic Forecasting*. 2023;(2):6–28. (In Russ)
13. Rashidova I.A., Rashidov O.I., Okorokov V.M. Monetary policy as an instrument of state regulation of the economy. *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2021;(6):101–116. (In Russ)

14. The main directions of the unified state monetary policy for 2024 and the period 2025 and 2026. *Tsentrал'nyj bank RF = Central Bank of the Russian Federation*. (In Russ). Available at: https://cbr.ru/about_br/publ/ondkp/on_2024_2026/ (accessed 23.05.2025).
15. Chernov V.A. The problem of the Federal budget deficit and tax mechanisms of resource support for economic development. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskij menedzhment» = Scientific Journal of the National Research University of ITMO. The series "Economics and Environmental Management"*. 2024;(2):48–57. (In Russ)
16. Eriashvili N.D., Elizarova V.V. Inflation and modern Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii = Bulletin of the Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2023;(6):287–291. (In Russ)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Михайлович Володин

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

Viktor M. Volodin

Doctor of economical sciences,
professor, professor of the sub-
department of sociology, economic
theory and international processes,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Надежда Викторовна Володина

руководитель аналитического центра,
Почта России
(Россия, г. Москва, 3-я Песчаная улица, 2А)
E-mail: nadinvvv@mail.ru

Nadezhda V. Volodina

Head of the analytical center,
Russian Post
(2A 3-ya Peschanaya street, Moscow,
Russia)

Лилия Валерьевна Рожкова

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

Lilia V. Rozhkova

Doctor of sociological sciences,
professor, head of the sub-department
of sociology, economic theory
and international processes,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Инна Анатольевна Питайкина

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

Inna A. Pitaikina

Candidate of economical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of sociology,
economic theory and international
processes,
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 11.05.2025

Поступила после рецензирования/Revised 04.06.2025

Принята к публикации/Accepted 07.06.2025

ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ПРЕДИКТИВНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д. О. Скобелев¹, А. Ю. Попов², В. А. Ганявин³,
В. М. Костылева⁴, А. С. Малявин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Москва, Россия
¹dskobelev@eipc.center, ²a.popov@eipc.center, ³v.ganyavin@eipc.center,
⁴v.kostyleva@eipc.center, ⁵a.malyavin@eipc.center

Аннотация. *Актуальность и цели.* Успех в достижении технологического суверенитета и лидерства, экологического благополучия государства неразрывно связан с реализацией экологической промышленной политики и переходом на наилучшие доступные технологии. *Материалы и методы.* Методология разработки модели предиктивной системы контроля выбросов, а также ее испытаний и проверок основывается на сравнении данных косвенных измерений выбросов (полученных через моделирование) и прямых измерений выбросов (выполненных с использованием временно устанавливаемой автоматической измерительной системы). *Результаты.* Рассмотрены принципы построения предиктивных систем контроля выбросов загрязняющих веществ производственных процессов на основе математических моделей, разрабатываемых с использованием технологических данных. Кратко рассмотрены правовые основы применения таких систем на промышленных предприятиях в России и за рубежом. Проанализированы особенности технологических процессов, уровни их автоматизации, а также характерные загрязняющие вещества, выбрасываемые в атмосферный воздух в составе отходящих газов, для ключевых отраслей российской промышленности: теплоэнергетики, черной и цветной металлургии, переработки углеводородного сырья, производства минеральных удобрений, производства цемента. Рассмотрено понятие платформы предиктивной аналитики, показана актуальность ее развития, в том числе в части создания предиктивных систем контроля выбросов, в контексте промышленной и технологической политики Российской Федерации. *Выводы.* Преимущество использования больших объемов данных о процессе может быть реализовано на практике для получения полезной информации.

Ключевые слова: предиктивные системы контроля выбросов, предиктивная аналитика, сквозные технологии, наилучшие доступные технологии, эколого-технологическая модернизация

Для цитирования: Скобелев Д. О., Попов А. Ю., Ганявин В. А., Костылева В. М., Малявин А. С. Подходы к построению предиктивных систем контроля выбросов для современных промышленных технологических процессов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 46–64. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-4

APPROACHES TO CREATING EMISSION FORECASTING SYSTEMS FOR MODERN INDUSTRIAL PROCESSES

**D.O. Skobelev¹, A.Yu. Popov², V.A. Ganyavin³,
V.M. Kostyleva⁴, A.S. Malyavin⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5}Research Institute "Environmental Industry Policy Centre", Moscow, Russia

¹dskobelev@eipc.center, ²a.popov@eipc.center, ³v.ganyavin@eipc.center,

⁴v.kostyleva@eipc.center, ⁵a.malyavin@eipc.center

Abstract. *Background.* Success in achieving technological sovereignty, technological leadership and environmental well-being of the state is inextricably linked to the implementation of environmental industrial policy and the transition to the best available technologies. *Materials and methods.* The methodology for developing a predictive emission control system model, as well as its tests and verifications, is based on a comparison of indirect emission measurements (obtained through modeling) and direct emission measurements (performed using a temporarily installed automatic measuring system). *Results.* The principles of development of predictive emissions monitoring systems based on mathematical models using technological data are considered. The legal basis for the application of such systems at industrial facilities in Russia and abroad is briefly considered. The features of technological processes, their automation levels, as well as typical pollutants emitted into the atmospheric air as part of waste gases are analyzed for key sectors of Russian industry: power generation, ferrous and non-ferrous metallurgy, hydrocarbon processing, fertilizers production, cement production). The paper considers the concept of predictive analytics platform, shows the relevance of its development, including the creation of predictive emission monitoring systems, in the context of industrial and technological policy of the Russian Federation. *Conclusions.* The advantage of using large amounts of process data can be put into practice to obtain useful information.

Keywords: continuous emission monitoring systems, predictive analytics, end-to-end technologies, best available techniques, environmental and technological modernization

For citation: Skobelev D.O., Popov A.Yu., Ganyavin V.A., Kostyleva V.M., Malyavin A.S. Approaches to creating emission forecasting systems for modern industrial processes. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):46–64. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-4

Введение

Успех в достижении технологического суверенитета и лидерства, экологического благополучия государства неразрывно связан с реализацией экологической промышленной политики и переходом на наилучшие доступные технологии. Рассмотрение различных трактовок понятия «технологический суверенитет» в современной литературе [1–5] позволяет охарактеризовать его как способность государства самостоятельно обеспечивать свое научно-техническое и промышленное развитие при наличии возможности реализовывать фундаментальные и прикладные исследования, разрабатывать и внедрять критически значимые технологии и оборудование, в том числе при взаимодействии с другими странами без односторонней зависимости. Критической основой технологического суверенитета являются результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Развитие реального сектора экономики в условиях снижения импортозависимости и роста ресурсной эффективности требует внимания к вопросам

обеспечения высокого уровня защиты окружающей среды и здоровья человека. Важный источник информации для оценки эффективности экологической промышленной политики – достоверные данные о выбросах загрязняющих веществ, получаемые непосредственно на источниках загрязнения атмосферного воздуха в режиме реального времени. В мировой практике такие данные получают с применением систем автоматического контроля выбросов [6, 7]. Помимо прямых измерений газоанализаторами непосредственно в газоходе (дымовой трубе) или с извлечением пробы существуют косвенные методы, в которых показатели выбросов загрязняющих веществ моделируются с установлением корреляции их значений с рабочими параметрами технологической установки. Использование этих методов, включая возможности машинного и глубокого обучения, искусственного интеллекта и предиктивной аналитики, открывает потенциал для промышленной реализации предиктивных систем контроля выбросов на предприятиях с современными автоматизированными системами управления технологическим процессом (АСУ ТП) и развитой инфраструктурой сбора производственных данных, служащих источником для выявления тенденций и закономерностей [8, 9]. Расширение сферы применения предиктивных систем становится особенно важным в условиях разработки стимулирующих мер, направленных на добровольное оснащение автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов загрязняющих веществ объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, для которых такое оснащение не предусмотрено действующим законодательством¹.

Результаты и обсуждение

Правовое регулирование, стандартизация и метрологическое обеспечение контроля выбросов с применением предиктивных систем

Природоохранными требованиями ряда стран предусмотрено использование предиктивных систем контроля выбросов [8]. Для того чтобы такие системы получили одобрение национальных надзорных органов, их создание и эксплуатация должны опираться на четко регламентированную нормативную основу. В этих целях в США действуют требования стандарта PS-16², Раздела 40 Свода федеральных нормативных актов³; в странах Европейского союза – стандарта CEN/TS 17198⁴; в КНР – Технического руководства к системам мониторинга эмиссий дымовых газов тепловых электростанций⁵. В России в 2025 г. вводятся в действие ряд стандартов, определяющих общие понятия, классификацию и требования к системам автоматического контроля выбросов,

¹ Перечень поручений по итогам заседания Совета по стратегическому развитию и нацпроектам и комиссий Госсовета по направлениям социально-экономического развития (утв. Президентом РФ 04.08.2024 № Пр-1533).

² U.S. Performance specification 16 – specifications and test procedures for predictive emission monitoring systems in stationary sources.

³ U.S. Code of Federal Regulations. Title 40. Protection of Environment.

⁴ CEN/TS 17198:2018 CEN/TS 17198–2018 Stationary source emissions. Predictive Emission Monitoring Systems (PEMS). Applicability, execution and quality assurance.

⁵ T/CAEPI 13–2018. Technical guide of process (operating status) monitoring system for flue gas emission from thermal power plant.

в том числе к предиктивным¹. Таким образом, понятие предиктивной системы контроля выбросов постепенно закрепляется в российской нормативно-технической документации.

*Возможность применения предиктивных систем контроля выбросов
в различных производственных процессах*

Создание и внедрение предиктивной системы контроля выбросов для того или иного технологического процесса включает следующие основные этапы:

- сбор и анализ данных о выбросах и параметрах процесса с определением взаимосвязей между ними;
- определение ключевых технологических параметров и допустимых диапазонов их изменения, влияющих на уровень выбросов загрязняющих веществ;
- разработка и тестирование модели (выбор типа модели, ее построение и экспериментальная проверка);
- проведение испытаний системы для утверждения ее типа;
- запуск системы в промышленную эксплуатацию.

Методология разработки модели предиктивной системы контроля выбросов, а также ее испытаний и проверок основывается на сравнении данных косвенных измерений выбросов (полученных через моделирование) и прямых измерений выбросов (выполненных с использованием временно устанавливаемой автоматической измерительной системы). Для обеспечения достоверности данных предиктивная система контроля выбросов должна создаваться с учетом различных режимов работы оборудования, включая минимальную, нормальную и пиковую нагрузки.

Подходы к моделированию показателей выбросов могут включать как построение моделей, описывающих происходящие при образовании загрязняющих веществ физико-химические процессы [10–14], так и создание эмпирических моделей на основе анализа данных с использованием методов многомерного статистического анализа, статистической регрессии, машинного и глубокого обучения, нейронных сетей, искусственного интеллекта [15–27]. Возможно построение гибридных моделей, сочетающих оба подхода [28].

Несмотря на то, что типичная схема построения предиктивной системы контроля выбросов для различных производств включает схожие элементы (рис. 1), для каждой отрасли требуется учет особенностей ведения технологического процесса и подходов к автоматизации.

¹ ГОСТ Р 71505–2024. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Общие положения ; ГОСТ Р 71507–2024. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Термины и определения ; ГОСТ Р 71508–2024. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Классификация ; ГОСТ Р 71509–2024. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Технические условия.

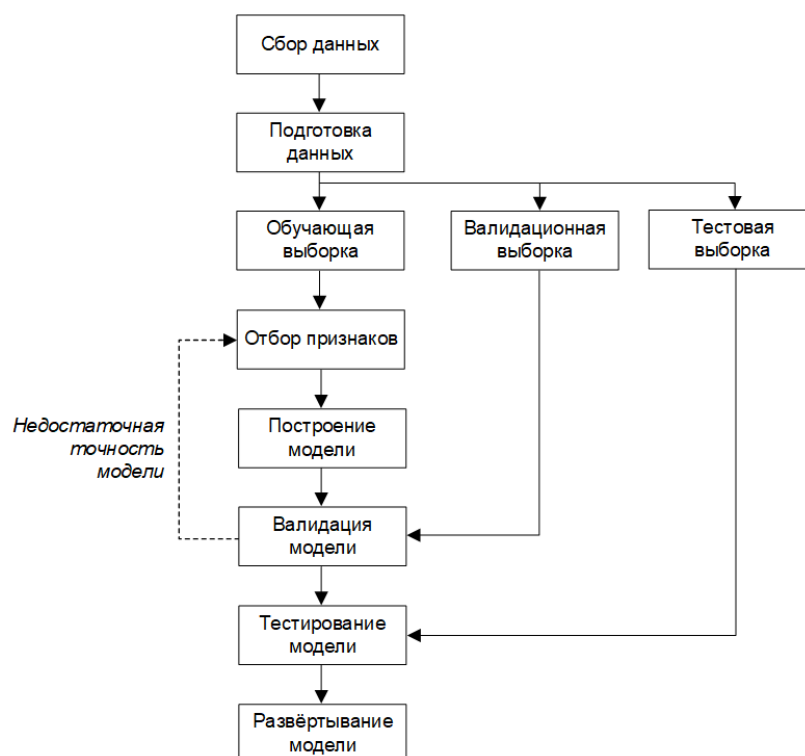


Рис. 1. Процесс построения предиктивной системы контроля выбросов

Тепловые электростанции

На российских предприятиях по производству электрической и тепловой энергии с использованием топливосжигающих энергетических установок обязательному оснащению источников выбросов загрязняющих веществ системами автоматического контроля подлежат паровые котлы, работающие на жидком и твердом топливе¹. На паротурбинных тепловых электростанциях реализуются две технологии сжигания твердого топлива: в потоке горячего воздуха (факельное сжигание) и в циркулирующем кипящем слое.

Режимы работы энергосистемы и электростанций определяются характеристиками графиков электрических и тепловых нагрузок потребителей, составом работающего в энергосистеме оборудования и его маневренными характеристиками, наличием пиковых и резервных мощностей. Особенности энергетического производства являются непрерывность, соответствие выработки электроэнергии ее потреблению, работа электростанций по графику потребления, имеющему пики и провалы нагрузки.

¹ Об утверждении видов технических устройств, оборудования или их совокупности (установок) на объектах I категории, стационарные источники выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ которых подлежат оснащению автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду : распоряжение Правительства РФ № 428-р от 13.03.2019.

Минимальная нагрузка котла определяется устойчивостью процесса горения, гидравлическим режимом испарительных поверхностей котла, режимом работы пароперегревателей и низкотемпературной коррозией хвостовых поверхностей котла. Максимальная нагрузка котла лимитируется механизмами собственных нужд, шлакованием поверхностей нагрева, износом хвостовых поверхностей котла, высокотемпературной коррозией поверхностей нагрева.

Основные загрязняющие вещества в составе дымовых газов тепловых электростанций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Выбрасываемые в атмосферный воздух загрязняющие вещества, характерные для крупных топливосжигающих энергогенерирующих установок¹

Виды топлива	Основные загрязняющие вещества в дымовых газах				
	NO ₂	NO	CO	SO ₂	Зола твердого топлива
Твердые	+	+	+	+	+
Жидкие нефтяные	+	+	+	+	–
Газообразные	+	+	+	–	–

Автоматизированное управление технологическим процессом на тепловых электростанциях направлено прежде всего на поддержание соответствия между количествами вырабатываемой и потребляемой энергии, а также на повышение технико-экономической эффективности производства. Как объект управления энергетический блок котла и турбогенератора представляет собой сложную динамическую систему с набором взаимосвязанных входных и выходных величин. К основным регулирующим воздействиям относятся расход топлива и питательной воды, к регулируемым параметрам – активная электрическая мощность генератора и частота вращения ротора турбины. Вспомогательные процессы на тепловых электростанциях, такие как загрузка бункеров сырого угля, транспортировка по тракту топливоподачи, пылеприготовление, подготовка мазута, химическая очистка и подготовка воды, редуционно-охладительные установки, также автоматизированы.

Тепловые электростанции, в том числе угольные, в последнее время становятся востребованным объектом для моделирования выбросов NO_x и SO₂ с применением методов машинного и глубокого обучения [29–35].

Производство минеральных удобрений

В охват химико-технологических процессов отрасли минеральных удобрений входят синтез аммиака, получение неорганических кислот (серной, азотной, фосфорной), производство полного ассортимента минеральных удобрений. Технологические процессы отрасли минеральных удобрений характеризуются высоким энергопотреблением. В химико-технологических процессах основной

¹ Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2024.

расход топливно-энергетических ресурсов приходится на нагрев и охлаждение технологических потоков (сырья, полупродуктов, продуктов), подвод тепла в эндотермических процессах. Наибольшим расходом энергетических ресурсов характеризуется производство азотных удобрений. При этом производству аммиака, азотной кислоты, серной кислоты, аммиачной селитры сопутствует выработка вторичных энергетических ресурсов (пар, электроэнергия).

Эксплуатация технологических установок и агрегатов сопровождается выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, связанными со сжиганием природного газа в турбинах, котлах, компрессорах и других системах для выработки энергии и тепла, а также образующихся в результате конверсии сырья. В табл. 2 приведены основные загрязняющие вещества в составе отходящих газов основных технологических процессов, действующих в отрасли минеральных удобрений¹.

Таблица 2

Выбрасываемые в атмосферный воздух загрязняющие вещества, характерные для технологических процессов отрасли минеральных удобрений

Технологический процесс	Основные загрязняющие вещества в отходящих газах									
	NO ₂	NO	CO	SO ₂	SO ₃	Туман H ₂ SO ₄	NH ₃	HF	SiF ₄	NH ₄ NO ₃
Синтез аммиака, включая отделение конверсии природного газа	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
Производство серной кислоты	–	–	–	+	+	+	–	–	–	–
Производство азотной кислоты	+	+	–	–	–	–	+	–	–	–
Производство экстракционной фосфорной кислоты	–	–	–	–	–	–	–	+	+	–
Производство комплексных удобрений	–	–	–	–	–	–	+	+	+	–
Производство аммиачной селитры	–	–	–	–	–	–	+	–	–	+
Синтез карбамида	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–

Современное производство минеральных удобрений отличается высокой степенью автоматизации, обусловленной высокой скоростью и сложностью протекания технологических процессов, структурной сложностью их аппаратного оформления, присутствием агрессивных и токсичных сред в технологических потоках, чувствительностью к отклонениям от заданного

¹ Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 2-2022.

режима, строгими требованиями к обеспечению взрыво- и пожарной безопасности, охраны окружающей среды. Для многих крупнотоннажных химико-технологических процессов характерны запаздывание реакции контролируемых параметров на управляющие воздействия и отсутствие возможности прямых непрерывных измерений показателей процесса. Ретроспектива развития отрасли минеральных удобрений показывает, что тенденция перехода к агрегатам большой единичной мощности в 60–70-х гг. прошлого века привела к значительному росту объема собираемой и обрабатываемой информации о ходе процесса и введению в эксплуатацию АСУ ТП в химической промышленности.

К примерам моделирования редко измеряемых показателей по технологическим данным в аммиачном производстве можно отнести создание моделей прогнозирования содержания серы в сырье на стадии очистки природного газа от сернистых соединений [36].

Переработка углеводородов

К переработке углеводородного сырья (нефти, природного газа, попутного нефтяного газа, газового конденсата) относится большое разнообразие технологических процессов, применяемых на нефтеперерабатывающих, газоперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

Для нефтеперерабатывающих заводов характерны технологии первичного разделения нефти на фракции, процессы облагораживания выделенных фракций (изомеризация, каталитический риформинг, гидроочистка), процессы глубокой переработки (каталитический крекинг, гидрокрекинг, висбрекинг, замедленное коксование), технологии производства масел. К основным организованным источникам выбросов загрязняющих веществ относятся дымовые трубы печей, факельные установки, регенераторы установок каталитического крекинга, выхлопные трубы хвостовых газов получения серной кислоты и элементарной серы, газомоторные компрессоры.

К технологиям газопереработки относят процессы очистки, осушки, низкотемпературной сепарации, низкотемпературной абсорбции, низкотемпературной адсорбции, газофракционирования, стабилизации, извлечения гелия, получения газовой серы методом Клауса. Основные источники выбросов загрязняющих веществ – дымовые трубы технологических печей, подогревателей, а также установок производства газовой серы.

Производства нефтехимической промышленности представлены различными цепочками из десятков технологических процессов, наиболее крупнотоннажными из которых являются такие процессы, как получение этилена и других низших олефинов пиролизом углеводородного сырья, дегидрирование изобутана, синтез метанола. В табл. 3 приведены основные загрязняющие вещества, присутствующие в отходящих газах установок, работающих на предприятиях по переработке углеводородного сырья.

Современные процессы нефтепереработки имеют высокую степень автоматизации. К основным контролируемым и регулируемым параметрам относятся температура, давление, расход газа или жидкости, уровень жидкости в сосудах, углеводородный или фракционный состав сырья или продуктов. Объектами автоматизации являются реакторы, ректификационные колонны, теплообменники, трубчатые печи, емкости, компрессоры, насосы. Большинство крупнотоннажных установок нефтепереработки работает в непрерывном

или полунепрерывном режиме, при котором одна из стадий может быть периодической. При управлении процессами нефтепереработки может проявляться инерционность, при которой возникает запаздывание эффекта возмущающего воздействия.

Таблица 3

Выбрасываемые в атмосферный воздух загрязняющие вещества, характерные для крупнотоннажных технологических процессов нефтеперерабатывающей, газоперерабатывающей и нефтехимической отраслей¹

Технологический процесс	Основные загрязняющие вещества в отходящих газах							
	NO ₂	NO	CO	SO ₂	CH ₄	H ₂ S	C ₂ H ₄ + C ₃ H ₆	CH ₃ OH
Атмосферно-вакуумная перегонка нефтяного сырья, изомеризация, каталитический риформинг, гидроочистка, каталитический крекинг, гидрокрекинг, получение водорода, стабилизация газового конденсата	+	+	+	+	+	–	–	–
Производство серы методом Клауса	+	+	+	+	+	+	–	–
Пиролиз углеводородного сырья	+	+	+	–	–	–	+	–
Каталитическое дегидрирование изобутана	+	+	+	–	–	–	–	–
Синтез метанола	+	+	+	–	–	–	–	+

В мировой практике предиктивные системы контроля выбросов применяются при моделировании показателей хвостовых газов производства серы, газов регенераторов каталитического крекинга, дымовых газов печей пиролиза [37–39].

Черная и цветная металлургия

В структуру интегрированных предприятий черной металлургии входят агломерационное, коксохимическое, доменное, сталеплавильное и прокатное производства. В выбросах в атмосферный воздух всех перечисленных переделов присутствуют диоксид азота, монооксид азота, монооксид углерода и диоксид серы. В технологических процессах отрасли цветной металлургии состав выбросов загрязняющих веществ характерен для различных видов

¹ Переработка нефти : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 30-2021 ; Переработка природного и попутного газа : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 50-2022 ; Производство основных органических химических веществ : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 18-2023.

продукции и того или иного передела. Так, например, для электролизного производства первичного алюминия характерными выбросами являются газообразные и твердые фториды, диоксид серы и взвешенные вещества (табл. 4).

Таблица 4

Выбрасываемые в атмосферный воздух загрязняющие вещества, характерные для некоторых технологических процессов черной и цветной металлургии¹

Технологический процесс	Основные загрязняющие вещества в отходящих газах					
	NO ₂	NO	CO	SO ₂	взвешенные вещества	газообразные и твердые фториды
Производство агломерата, производство кокса, производство чугуна, производство стали в конвертерах, производство стали в электродуговых печах	+	+	+	+	+	–
Производство алюминия, стадия электролиза глинозема	–	–	–	+	+	+

Разнообразие технологических процессов и режимов работы оборудования, большой объем и ассортимент продукции обуславливают необходимость комплексной автоматизации металлургического производства. В частности, для автоматизированного управления процессом доменной плавки применяют системы управления шихтоподачей, загрузкой доменной печи, нагревом воздухонагревателей, для максимально полезного использования газов применяют системы автоматического контроля и управления газораспределением; при автоматизированном управлении конвертерным процессом учитываются такие показатели, как расход кислорода, положение продувочной формы, временное распределение присадок сыпучих материалов, содержание углерода, температура металла, содержание оксидов углерода с целью обеспечения технико-экономических показателей плавки; в прокатном производстве в АСУ ТП входят подсистемы управления процессами загрузки слабов в печи, их нагрева, выгрузки из печей, прокатки металла, охлаждения полос, свертывания готовых полос в рулоны, их маркировки. В электросталеплавильном производстве управление плавкой осуществляется путем автоматического контроля мощности дуги, регулирования положения электродов, температуры в печи. В электролизном производстве первичного алюминия управление режимом электролизеров выполняется путем регулирования межполюсного расстояния, контроля силы тока, температуры в электролизных ваннах. Особенностью алюминиевого производства с точки зрения автоматизированного управления является наличие большого количества отдельных однотипных объектов управления – алюминиевых электролизеров, включенных последовательно в одну цепь.

¹ Производство чугуна, стали и ферросплавов : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 26-2022 ; Производство алюминия : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 11-2024.

Для металлургической отрасли имеется опыт моделирования выбросов монооксида углерода коксовых батарей [40], выбросов оксидов азота электродуговых печей [41].

Производство цемента

Выбрасываемые через организованные источники загрязняющие вещества в производстве цемента образуются на стадии обжига клинкера, в их число входят монооксид азота, диоксид азота, диоксид серы, монооксид углерода, неорганическая пыль (табл. 5). При применении альтернативных видов топлива возможны выбросы хлористого водорода, фтористого водорода, тяжелых металлов.

Таблица 5

Выбрасываемые в атмосферный воздух загрязняющие вещества, характерные для цементного производства

Вид топлива	Основные загрязняющие вещества в отходящих газах							
	взвешенные вещества	NO ₂	NO	SO ₂	CO	HF	HCl	тяжелые металлы
Традиционные ископаемые	+	+	+	+	+	–	–	–
Альтернативные	+	+	+	+	+	+	+	+

Система управления вращающейся печью обеспечивает оптимальные тепловые режимы по сечению, регулирование угла наклона печи, скорости вращения на всех стадиях. К регулируемым параметрам относятся также мощность горелок, подача воздуха. Исследования в области моделирования выбросов в процессе обжига клинкера направлены как на установление влияния альтернативного топлива на концентрации NO_x [42], так и на прогнозирование показателей выбросов с использованием данных параметров режима работы вращающейся печи [43–47], в том числе на производствах, оснащенных системами селективного некаталитического восстановления оксидов азота [48].

Предиктивная система контроля выбросов в составе платформы предиктивной аналитики и цифрового двойника технологического процесса

Платформа предиктивной аналитики представляет собой комплекс технических и программных средств, направленных на оценку будущего состояния технологического процесса (системы) на основе анализа его текущего состояния. Для успешной реализации построения платформы необходимо наличие имитационной системы, которая включает систему внутреннего математического обеспечения (математические модели, математические методы обработки и анализа данных, аппроксимационные алгоритмы и др.) и внешнего математического обеспечения (наличие специализированных языков программирования, программных процедур, устройств, позволяющих реализовывать модель на ЭВМ) [49]. Прогнозирование показателей выбросов загрязняющих веществ – одно из актуальных направлений предиктивной аналитики, к которым также относятся раннее обнаружение отклонений в работе оборудования, определение редко измеряемых или неизмеряемых параметров процесса, формирование эталонных профилей ресурсо- и энергозатрат [50].

В свою очередь, инструменты предиктивной аналитики относятся к элементам цифрового двойника производства, представляющего собой интегрированную виртуальную репрезентацию реальных производственных объектов и процессов, управляемую на основе данных, с синхронизированным взаимодействием с заданной частотой и точностью¹.

Разработка и интеграция инструментов предиктивной аналитики в технологические процессы может рассматриваться как одно из передовых направлений сквозных технологий при технологической модернизации производственных систем экономики, направленной на обеспечение ее ресурсной эффективности и глобальной конкурентоспособности, в том числе в рамках действия нового Федерального закона № 523-ФЗ от 28.12.2024 «О технологической политике в Российской Федерации»².

Заключение

Разработка систем контроля выбросов на основе предиктивных моделей становится все более актуальной в условиях цифровой трансформации реального сектора экономики и роста внимания к сквозным технологиям на государственном уровне. Преимущество использования больших объемов данных о процессе может быть реализовано на практике для получения полезной информации, в том числе для прогнозирования показателей выбросов загрязняющих веществ, во всех ключевых отраслях производства, включая черную и цветную металлургию, переработку углеводородного сырья, производство минеральных удобрений, производство электрической и тепловой энергии с использованием топливосжигающих энергетических установок. Вместе с тем ввиду специфичности того или иного производственного процесса для перечисленных отраслей, уровня его автоматизации и порядка обращения с собранными данными для конкретной технологической установки необходима разработка индивидуальной предиктивной системы контроля выбросов, адаптированной к особенностям ее функционирования.

Список литературы

1. Шкодинский С. В., Продченко И. А., Матюхин В. Н. Контуры современной промышленной политики России в обеспечении технологического суверенитета страны // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 1. С. 111–121.
2. Сухарев О. С. Технологический суверенитет России: формирование на базе развития сектора «экономика знаний» // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2024. № 1. С. 47–64. doi: 10.52180/2073-6487_2024_1_47_64
3. Потапцева Е. В., Акбердина В. В., Пономарева А. О. Концепция технологического суверенитета в современной государственной политике России // AlterEconomics. 2024. Т. 21, № 4. С. 818–842. doi: 10.31063/AlterEconomics/2024.21-4.9
4. Crespi F., Caravella S., Menghini M., Salvatori C. European Technological Sovereignty: An Emerging Framework for Policy Strategy // Intereconomics. 2001. Vol. 56. P. 348–354. doi: 10.1007/s10272-021-1013-6

¹ A glossary of digital twins and digital twin technology from the Digital Twin Consortium // Digital Twin Consortium. URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/glossary/glossary.html> (дата обращения: 25.03.2025)

² О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон № 523-ФЗ от 28.12.2024.

5. Edler J., Blind K., Kroll H., Schubert T. Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy. Defining rationales, ends and means // *Research Policy*. 2023. Vol. 52, is. 6. P. 104765. doi: 10.1016/j.respol.2023.104765
6. Конопелько Л. А., Попов О. Г., Кустиков Ю. А. [и др.]. Контроль промышленных выбросов автоматическими измерительными системами. М.: ТРИУМФ, 2021. 288 с.
7. Стороженко П. А., Скобелев Д. О., Малявин А. С. [и др.]. Международный и российский опыт нормативно-правового регулирования применения систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ промышленных предприятий // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26, № 4. С. 37–43. doi: 10.18412/1816-0395-2022-4-37-43
8. Мешалкин В. П., Скобелев Д. О., Попов А. Ю. Автоматический контроль выбросов: опыт применения предсказывающих систем // *Компетентность*. 2020. № 9-10. С. 15–21. doi: 10.24411/1993-8780-2020-10902
9. Грачев В. А., Скобелев Д. О., Попов А. Ю. Развитие предиктивных систем контроля выбросов загрязняющих веществ // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24, № 10. С. 43–49. doi: 10.18412/1816-0395-2020-10-43-49
10. Zhang H. [et al.]. Dynamic prediction of in-situ SO₂ emission and operation optimization of combined desulfurization system of 300 MW CFB boiler // *Fuel*. 2022. Vol. 324. P. 124421. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124421
11. Eslick J. C. [et al.]. Predictive modeling of a subcritical pulverized-coal power plant for optimization: Parameter estimation, validation, and application // *Applied Energy*. 2022. Vol. 319. P. 119226. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119226
12. Hu Z., Jiang E., Ma X. Numerical simulation on NO_x emissions in a municipal solid waste incinerator // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. P. 650–664. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.127
13. Belošević S. [et al.]. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 74. P. 102–110. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.019
14. Lisandy K. Y. [et al.]. Prediction of unburned carbon and NO formation from low-rank coal during pulverized coal combustion: Experiments and numerical simulation // *Fuel*. 2016. Vol. 185. P. 478–490. doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.026
15. Li R. [et al.]. Real-time prediction of SO₂ emission concentration under wide range of variable loads by convolution-LSTM VE-transformer // *Energy*. 2023. Vol. 269. P. 126781. doi: 10.1016/j.energy.2023.126781
16. Tan P. [et al.]. Dynamic modeling of NO_x emission in a 660 MW coal-fired boiler with long short-term memory // *Energy*. 2019. Vol. 176. P. 429–436. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.020
17. Yang G., Wang Y., Li X. Prediction of the NO_x emissions from thermal power plant using long-short term memory neural network // *Energy*. 2020. Vol. 192. P. 116597. doi: 10.1016/j.energy.2019.116597
18. Thieu V. In-depth numerical analysis of combustion and NO_x emission characteristics in a 125 MWe biomass boiler // *Fuel*. 2023. Vol. 332. P. 125961. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125961
19. Wang Z. [et al.]. A dynamic modeling method using channel-selection convolutional neural network: A case study of NO_x emission // *Energy*. 2024. Vol. 290. P. 130270. doi: 10.1016/j.energy.2024.130270
20. Wu Y. A novel data-driven approach for coal-fired boiler under deep peak shaving to predict and optimize NO_x emission and heat exchange performance // *Energy*. 2024. Vol. 304. P. 132106. doi: 10.1016/j.energy.2024.132106
21. Dirik M. Prediction of NO_x emissions from gas turbines of a combined cycle power plant using an ANFIS model optimized by GA // *Fuel*. 2022. Vol. 321. P. 124037. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124037

22. Liou J.-L., Liao K.-C., Wen H.-T., Wu H.-Yu. A study on nitrogen oxide emission prediction in Taichung thermal power plant using artificial intelligence (AI) model // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 63. P. 1–9. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.120
23. Yu H., Gao M., Zhang H., Chen Y. Dynamic modeling for SO₂-NO_x emission concentration of circulating fluidized bed units based on quantum genetic algorithm – Extreme learning machine // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 324. P. 129170. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129170
24. Tang Z. [et al.]. Auto-encoder-extreme learning machine model for boiler NO_x emission concentration prediction // *Energy*. 2022. Vol. 256. P. 124552. doi: 10.1016/j.energy.2022.124552
25. Wang X., Liu W., Wang Y., Yang G. A hybrid NO_x emission prediction model based on CEEMDAN and AM-LSTM // *Fuel*. 2022. Vol. 310. P. 122486. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122486
26. Han Z., Xie Y., Moinul Hossain Md., Xu C. A hybrid deep neural network model for NO_x emission prediction of heavy oil-fired boiler flames // *Fuel*. 2023. Vol. 333. P. 126419. doi: 10.1016/j.fuel.2022.126419
27. Si M., Du K. Development of a predictive emissions model using a gradient boosting machine learning method // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 20. P. 101028. doi: 10.1016/j.eti.2020.101028
28. Chen J. [et al.]. Dynamic prediction of SO₂ emission based on hybrid modeling method for coal-fired circulating fluidized bed // *Fuel*. 2023. Vol. 346. P. 128284. doi: 10.1016/j.fuel.2023.128284
29. An B. [et al.]. Dynamic NO_x Prediction Model for SCR Denitrification Outlet of Coal-Fired Power Plants Based on Hybrid Data-Driven and Model Ensemble // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. Vol. 62, is. 36. P. 14286–14299. doi: 10.1021/acs.iecr.3c01559
30. Wang Y. An Ensemble Deep Belief Network Model Based on Random Subspace for NO_x Concentration Prediction // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, is. 11. P. 7655–7668. doi: 10.1021/acsomega.0c06317
31. Li Q. [et al.]. Dynamic NO_x Emission Modeling in a Utility Circulating Fluidized Bed Boiler Considering Denoising and Multi-Frequency Domain Information // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 790. doi: 10.3390/en18040790
32. Wang Z. [et al.]. A predictive model with time-varying delays employing channel equalization convolutional neural network for NO_x emissions in flexible power generation // *Energy*. 2024. Vol. 306. P. 132495. doi: 10.1016/j.energy.2024.132495
33. Yuan Z. [et al.]. Prediction of NO_x emissions for coal-fired power plants with stacked-generalization ensemble method // *Fuel*. 2021. Vol. 289. P. 119748. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119748
34. Xie P. [et al.]. Dynamic modeling for NO_x emission sequence prediction of SCR system outlet based on sequence to sequence long short-term memory network // *Energy*. 2020. Vol. 190. P. 116482. doi: 10.1016/j.energy.2019.116482
35. Wang Y., Chen X., Zhao C. A data-driven soft sensor model for coal-fired boiler SO₂ concentration prediction with non-stationary characteristic // *Energy*. 2024. Vol. 300. P. 131522. doi: 10.1016/j.energy.2024.131522
36. Heryuano B. T., Nazaruddin Y. Y., Hadisupadmo S. Predicting Sulfur Content of Desulfurizer using Data-Driven based Inferential Measurement: An Ammonia Plant Case // *2020 IEEE 8th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*: Melaka, Malaysia, 2020. P. 178–183. doi: 10.1109/ICSPC50992.2020.9305785
37. Bonavita N., Ciarlo G. Inferential sensors for emission monitoring: An industrial perspective // *Frontiers in Environmental Engineering*. 2014. Vol. 3. P. 21–28.
38. Ciarlo G., Bonavita N. Fulfilling evolving end-users expectations for site-wide emission monitoring: The role of PEMS // *12th International Conference and Exhibition on Emission Monitoring*. Lisbon, 2016.

39. Cheng A. M., Hagen G. F. An accurate predictive emissions monitoring system (PEMS) for an ethylene furnace // *Environmental Progress*. 1996. Vol. 15, is. 1. P. 19–27. doi: 10.1002/ep.670150115
40. Saiepour M. [et al.]. Development and Assessment of Predictive Emission Monitoring Systems (PEMS) Models in the Steel Industry // *AISTech 2006: Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. Cleveland, Ohio, 2006.
41. Seol Y. [et al.]. An Interpretable Time Series Forecasting Model for Predicting NOx Emission Concentration in Ferroalloy Electric Arc Furnace Plants // *Mathematics*. 2024. Vol. 12 (6). P. 878. doi: 10.3390/math12060878
42. Öztürk B., Öztürk O., Karademir A. NOx emission modeling at cement plants with co-processing alternative fuels using ANN // *Environmental Engineering Research*. 2022. Vol. 27 (5). P. 210277. doi: 10.4491/eer.2021.277
43. Okoji A. I. [et al.]. Evaluation of adaptive neuro-fuzzy inference system-genetic algorithm in the prediction and optimization of NOx emission in cement precalcining kiln // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 54835–54845. doi: 10.1007/s11356-023-26282-0
44. Zhang Y. [et al.]. ANN-GA approach for predictive modelling and optimization of NOx emissions in a cement precalcining kiln // *International Journal of Environmental Studies*. 2017. Vol. 74 (2). P. 253–261. doi: 10.1080/00207233.2017.1280322
45. Zheng J., Du W., Lang Z., Qian F. Modeling and Optimization of the Cement Calcination Process for Reducing NOx Emission Using an Improved Just-In-Time Gaussian Mixture Regression // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59, is. 1. P. 4987–4999. doi: 10.1021/acs.iecr.9b05207
46. Usman M., Ahmad I., Ahsan M., Caliskan H. Prediction and optimization of emissions in cement manufacturing plant under uncertainty by using artificial intelligence-based surrogate modeling // *Environment, Development and Sustainability*. 2024. doi: 10.1007/s10668-024-05068-5
47. Guo Y., Mao Z. A long sequence NOx emission prediction model for rotary kilns based on transformer // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2024. Vol. 251. P. 105151. doi: 10.1016/j.chemolab.2024.105151
48. Hao X. [et al.]. Multi-objective prediction for denitration systems in cement: an approach combining process analysis and bi-directional long short-term memory network // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 30408–30429. doi: 10.1007/s11356-022-24021-5
49. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М. : Наука, 1981. 488 с.
50. Скобелев Д. О., Ганявин В. А., Куцевич Н. А. Предиктивная аналитика как инструмент повышения эффективности промышленного предприятия // *Автоматизация и ИТ в нефтегазовой отрасли*. 2023. № 3 (53).

References

1. Shkodinsky S.V., Prodchenko I.A., Matyukhin V.N. Contours of Russia's modern industrial policy in ensuring the country's technological sovereignty. *Vestnik evrazijskoj nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2024;16(1):111–121. (In Russ)
2. Sukharev O.S. Technological sovereignty of Russia: formation of the "knowledge economy" sector on the basis of development. *Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2024;(1):47–64. (In Russ). doi: 10.52180/2073-6487_2024_1_47_64
3. Potaptseva E.V., Akberdina V.V., Ponomareva A.O. The concept of technological sovereignty in modern Russian state policy. *AlterEconomics*. 2024;21(4):818–842. (In Russ). doi: 10.31063/AlterEconomics/2024.21-4.9
4. Crespi F., Caravella S., Menghini M., Salvatori C. European Technological Sovereignty: An Emerging Framework for Policy Strategy. *Intereconomics*. 2001;56:348–354. doi: 10.1007/s10272-021-1013-6

5. Edler J., Blind K., Kroll H., Schubert T. Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy. Defining rationales, ends and means. *Research Policy*. 2023;52(6):104765. doi: 10.1016/j.respol.2023.104765
6. Konopelko L.A., Popov O.G., Kustikov Yu.A. et al. *Kontrol' promyshlennykh vybrosov avtomaticheskimi izmeritel'nymi sistemami = Control of industrial emissions by automatic measuring systems*. Moscow: TRIUMF, 2021:288. (In Russ)
7. Storozhenko P.A., Skobelev D.O., Malyavin A.S. et al. International and Russian experience in regulatory regulation of the use of automatic control systems for emissions of pollutants from industrial enterprises. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2022;26(4):37–43. (In Russ). doi: 10.18412/1816-0395-2022-4-37-43
8. Meshalkin V.P., Skobelev D.O., Popov A.Yu. Automatic emission control: experience in the application of predictive systems. *Kompetentnost' = Competence*. 2020;(9–10): 15–21. (In Russ). doi: 10.24411/1993-8780-2020-10902
9. Grachev V.A., Skobelev D.O., Popov A.Yu. Development of predictive control systems for pollutant emissions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2020;24(10):43–49. (In Russ). doi: 10.18412/1816-0395-2020-10-43-49
10. Zhang H. et al. Dynamic prediction of in-situ SO₂ emission and operation optimization of combined desulfurization system of 300 MW CFB boiler. *Fuel*. 2022;324:124421. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124421
11. Eslick J.C. et al. Predictive modeling of a subcritical pulverized-coal power plant for optimization: Parameter estimation, validation, and application. *Applied Energy*. 2022;319:119226. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119226
12. Hu Z., Jiang E., Ma X. Numerical simulation on NO_x emissions in a municipal solid waste incinerator. *Journal of Cleaner Production*. 2019;233:650–664. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.127
13. Belošević S. et al. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants. *Applied Thermal Engineering*. 2015;74:102–110. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.019
14. Lisandy K.Y. et al. Prediction of unburned carbon and NO formation from low-rank coal during pulverized coal combustion: Experiments and numerical simulation. *Fuel*. 2016;185:478–490. doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.026
15. Li R. et al. Real-time prediction of SO₂ emission concentration under wide range of variable loads by convolution-LSTM VE-transformer. *Energy*. 2023;269:26781. doi: 10.1016/j.energy.2023.126781
16. Tan P. et al. Dynamic modeling of NO_x emission in a 660 MW coal-fired boiler with long short-term memory. *Energy*. 2019;176:429–436. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.020
17. Yang G., Wang Y., Li X. Prediction of the NO_x emissions from thermal power plant using long-short term memory neural network. *Energy*. 2020;192:116597. doi: 10.1016/j.energy.2019.116597
18. Thieu V. In-depth numerical analysis of combustion and NO_x emission characteristics in a 125 MWe biomass boiler. *Fuel*. 2023;332:125961. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125961
19. Wang Z. et al. A dynamic modeling method using channel-selection convolutional neural network: A case study of NO_x emission. *Energy*. 2024;290:130270. doi: 10.1016/j.energy.2024.130270
20. Wu Y. A novel data-driven approach for coal-fired boiler under deep peak shaving to predict and optimize NO_x emission and heat exchange performance. *Energy*. 2024;304:132106. doi: 10.1016/j.energy.2024.132106
21. Dirik M. Prediction of NO_x emissions from gas turbines of a combined cycle power plant using an ANFIS model optimized by GA. *Fuel*. 2022;321:124037. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124037
22. Liou J.-L., Liao K.-C., Wen H.-T., Wu H.-Yu. A study on nitrogen oxide emission prediction in Taichung thermal power plant using artificial intelligence (AI) model. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;63:1–9. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.120

23. Yu H., Gao M., Zhang H., Chen Y. Dynamic modeling for SO₂-NO_x emission concentration of circulating fluidized bed units based on quantum genetic algorithm – Extreme learning machine. *Journal of Cleaner Production*. 2021;324:129170. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129170
24. Tang Z. et al. Auto-encoder-extreme learning machine model for boiler NO_x emission concentration prediction. *Energy*. 2022;256:124552. doi: 10.1016/j.energy.2022.124552
25. Wang X., Liu W., Wang Y., Yang G. A hybrid NO_x emission prediction model based on CEEMDAN and AM-LSTM. *Fuel*. 2022;310:122486. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122486
26. Han Z., Xie Y., Moinul Hossain Md., Xu C. A hybrid deep neural network model for NO_x emission prediction of heavy oil-fired boiler flames. *Fuel*. 2023;333:126419. doi: 10.1016/j.fuel.2022.126419
27. Si M., Du K. Development of a predictive emissions model using a gradient boosting machine learning method. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;20:101028. doi: 10.1016/j.eti.2020.101028
28. Chen J. et al. Dynamic prediction of SO₂ emission based on hybrid modeling method for coal-fired circulating fluidized bed. *Fuel*. 2023;346:128284. doi: 10.1016/j.fuel.2023.128284
29. An B. et al. Dynamic NO_x Prediction Model for SCR Denitrification Outlet of Coal-Fired Power Plants Based on Hybrid Data-Driven and Model Ensemble. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023;62(36):14286–14299. doi: 10.1021/acs.iecr.3c01559
30. Wang Y. An Ensemble Deep Belief Network Model Based on Random Subspace for NO_x Concentration Prediction. *ACS Omega*. 2021;6(11):7655–7668. doi: 10.1021/acsomega.0c06317
31. Li Q. et al. Dynamic NO_x Emission Modeling in a Utility Circulating Fluidized Bed Boiler Considering Denoising and Multi-Frequency Domain Information. *Energies*. 2025;18:790. doi: 10.3390/en18040790
32. Wang Z. et al. A predictive model with time-varying delays employing channel equalization convolutional neural network for NO_x emissions in flexible power generation. *Energy*. 2024;306:132495. doi: 10.1016/j.energy.2024.132495
33. Yuan Z. et al. Prediction of NO_x emissions for coal-fired power plants with stacked-generalization ensemble method. *Fuel*. 2021;289:119748. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119748
34. Xie P. et al. Dynamic modeling for NO_x emission sequence prediction of SCR system outlet based on sequence to sequence long short-term memory network. *Energy*. 2020;190:16482. doi: 10.1016/j.energy.2019.116482
35. Wang Y., Chen X., Zhao C. A data-driven soft sensor model for coal-fired boiler SO₂ concentration prediction with non-stationary characteristic. *Energy*. 2024;300:131522. doi: 10.1016/j.energy.2024.131522
36. Heryuano B.T., Nazaruddin Y.Y., Hadisupadmo S. Predicting Sulfur Content of Desulfurizer using Data-Driven based Inferential Measurement: An Ammonia Plant Case 2020 IEEE 8th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC): Melaka. *Malaysia*. 2020:178–183. doi: 10.1109/ICSPC50992.2020.9305785
37. Bonavita N., Ciarlo G. Inferential sensors for emission monitoring: An industrial perspective. *Frontiers in Environmental Engineering*. 2014;3:21–28.
38. Ciarlo G., Bonavita N. Fulfilling evolving end-users expectations for site-wide emission monitoring: The role of PEMS. *12th International Conference and Exhibition on Emission Monitoring*. Lisbon, 2016.
39. Cheng A.M., Hagen G.F. An accurate predictive emissions monitoring system (PEMS) for an ethylene furnace. *Environmental Progress*. 1996;15(1):19–27. doi: 10.1002/ep.670150115

40. Saiepour M. et al. Development and Assessment of Predictive Emission Monitoring Systems (PEMS) Models in the Steel Industry. *AISTech 2006: Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. Cleveland, Ohio, 2006.
41. Seol Y. [et al.]. An Interpretable Time Series Forecasting Model for Predicting NOx Emission Concentration in Ferroalloy Electric Arc Furnace Plants. *Mathematics*. 2024;12(6):878. doi: 10.3390/math12060878
42. Öztürk B., Öztürk O., Karademir A. NOx emission modeling at cement plants with co-processing alternative fuels using ANN. *Environmental Engineering Research*. 2022;27(5):210277. doi: 10.4491/eer.2021.277
43. Okoji A.I. et al. Evaluation of adaptive neuro-fuzzy inference system-genetic algorithm in the prediction and optimization of NOx emission in cement precalcining kiln. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30:54835–54845. doi: 10.1007/s11356-023-26282-0
44. Zhang Y. et al. ANN-GA approach for predictive modelling and optimization of NOx emissions in a cement precalcining kiln. *International Journal of Environmental Studies*. 2017;74(2):253–261. doi: 10.1080/00207233.2017.1280322
45. Zheng J., Du W., Lang Z., Qian F. Modeling and Optimization of the Cement Calcination Process for Reducing NOx Emission Using an Improved Just-In-Time Gaussian Mixture Regression. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020;59(1):4987–4999. doi: 10.1021/acs.iecr.9b05207
46. Usman M., Ahmad I., Ahsan M., Caliskan H. Prediction and optimization of emissions in cement manufacturing plant under uncertainty by using artificial intelligence-based surrogate modeling. *Environment, Development and Sustainability*. 2024. doi: 10.1007/s10668-024-05068-5
47. Guo Y., Mao Z. A long sequence NOx emission prediction model for rotary kilns based on transformer. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2024;251:105151. doi: 10.1016/j.chemolab.2024.105151
48. Hao X. et al. Multi-objective prediction for denitration systems in cement: an approach combining process analysis and bi-directional long short-term memory network. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30:30408–30429. doi: 10.1007/s11356-022-24021-5
49. Moiseev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza = Mathematical problems of system analysis*. Moscow: Nauka, 1981:488. (In Russ)
50. Skobelev D.O., Ganyavin V.A., Kutsevich N.A. Predictive analytics as a tool for increasing the efficiency of an industrial enterprise. *Avtomatizatsiya i IT v neftegazovoj otrasli = Automation and IT in the oil and gas industry*. 2023;(3). (In Russ)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Олегович Скобелев

доктор экономических наук, директор,
Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной
политики» (Россия, г. Мытищи,
Олимпийский пр-кт, 42)
E-mail: dskobelev@eipc.center

Dmitry O. Skobelev

Doctor of economical sciences, director,
Research Institute "Environmental Industry
Policy Centre"
(42 Olimpijskij avenue, Mytishchi, Russia)

Александр Юрьевич Попов

кандидат химических наук, ведущий
научный сотрудник отдела химической
и нефтехимической промышленности,
Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной
политики» (Россия, г. Мытищи,
Олимпийский пр-кт, 42)
E-mail: a.popov@eipc.center

Aleksandr Yu. Popov

Candidate of chemical sciences, lead
researcher of department of chemical
and petrochemical industry,
Research Institute "Environmental Industry
Policy Centre"
(42 Olimpijskij avenue, Mytishchi, Russia)

Василий Александрович Ганявин

кандидат технических наук, заместитель
руководителя инжинирингового центра,
Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной
политики»
(Россия, г. Мытищи, Олимпийский
пр-кт, 42)
E-mail: v.ganyavin@eipc.center

Vasily A. Ganyavin

Candidate of technical sciences, deputy
head of the engineering center,
Research Institute "Environmental Industry
Policy Centre"
(42 Olimpijskij avenue, Mytishchi, Russia)

Вера Михайловна Костылева

руководитель департамента химической
промышленности и автоматизации
производственных процессов,
Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной
политики»
(Россия, г. Мытищи, Олимпийский
пр-кт, 42)
E-mail: v.kostyleva@eipc.center

Vera M. Kostyleva

Head of department of chemical industry
and process automation,
Research Institute "Environmental Industry
Policy Centre"
(42 Olimpijskij avenue, Mytishchi, Russia)

Андрей Станиславович Малявин

кандидат технических наук, начальник
отдела химической и нефтехимической
промышленности,
Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной
политики»
(Россия, г. Мытищи, Олимпийский
пр-кт, 42)
E-mail: a.malyavin@eipc.center

Andrej S. Malyavin

Candidate of technical sciences,
head of the department of chemical
and petrochemical industry,
Research Institute "Environmental Industry
Policy Centre"
(42 Olimpijskij avenue, Mytishchi, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 02.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 15.05.2025

Принята к публикации/Accepted 01.06.2025

КОНФЛИКТ МЕЖДУНАРОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНТЕРЕСОВ

Н. С. Чернецова

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Устойчивое развитие экономической системы страны является функцией системы национальных интересов, реализация которых во многом определяется степенью эффективности функционирования международных экономических институтов. Целью исследования являются установление природы конфликта международных механизмов реализации национальных интересов и анализ порождающих его проблем функционирования современных международных экономических институтов. *Материалы и методы.* Для достижения данной цели использовались общенаучные и специальные методы: агрегирования, абстрагирования, систематизации анализируемого материала, группировки. Методология исследования базируется на институционально-эволюционной концепции и системном подходе. *Результаты.* Представлена концепция зависимости реализации национальных экономических интересов от степени эффективности функционирования международных экономических институтов. *Выводы.* Разрешение противоречий, успешный ответ на угрозы и вызовы, спровоцированные для международных экономических институтов современной геоэкономической ситуацией, являются необходимыми условиями преодоления конфликта международных механизмов реализации национальных экономических интересов, сохранения национального суверенитета и обеспечения устойчивого развития национальной экономической системы.

Ключевые слова: национальные интересы, механизмы реализации национальных интересов, конфликт механизмов

Для цитирования: Чернецова Н. С. Конфликт международных механизмов реализации национальных экономических интересов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 65–77. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-5

CONFLICT OF INTERNATIONAL MECHANISMS FOR IMPLEMENTING NATIONAL ECONOMIC INTERESTS

N.S. Chernetsova

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

Abstract. *Background.* Sustainable development of the country's economic system is a function of the system of national interests, the implementation of which is largely determined by the degree of effectiveness of international economic institutions. The purpose of

the study is to establish the nature of the conflict of international mechanisms for implementing national interests and analyze the problems of functioning of modern international economic institutions that generate it. *Materials and methods.* To achieve this goal, general scientific and special methods were used: aggregation, abstraction, systematization of the analyzed material, grouping. The research methodology is based on the institutional-evolutionary concept and systems approach. *Results.* The concept of dependence of the implementation of national economic interests on the degree of effectiveness of international economic institutions is presented. *Conclusions.* Resolving contradictions, a successful response to threats and challenges provoked for international economic institutions by the modern geo-economic situation, is a necessary condition for overcoming the conflict of international mechanisms for the implementation of national economic interests, preserving national sovereignty and ensuring sustainable development of the national economic system.

Keywords: national interests, mechanisms for realizing national interests, conflict of mechanisms

For citation: Chernetsova N.S. Conflict of international mechanisms for implementing national economic interests. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):65–77. (In Russ). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-5

Введение

Современный мир представляет резкое разделение на группу стран, обладающих экономической и военной силой и присвоивших себе право реализовывать свои национальные экономические интересы за счет более слабых в экономическом и военном аспектах государств, и стран, вынужденных мириться с такой ситуацией в силу собственной экономической и военной несостоятельности.

Сохранить данное положение призвана глобализация – новый способ обеспечения ресурсами процесса реализации национальных и личных интересов инициаторов и реализаторов глобализационных процессов за счет использования ресурсов стран, идущих в их фарватере. В целом глобализация – объективно созревший мировой процесс, формирующийся на основе углубления международного разделения труда, расширения масштабов внешней торговли, прогрессирующей интеграции и кооперации национальных производств различных стран.

Вместе с тем глобализация порождает новые вызовы и угрозы во взаимодействии национальных экономических субъектов, поскольку в международном экономическом пространстве:

- пересекаются и сталкиваются противоречивые национальные интересы стран-участниц международных экономических отношений;
- взаимодействуют различные экономические и политические режимы;
- сталкиваются противоборствующие силы, политические блоки;
- усиливается роль коалиций региональных государств;
- искажаются трактовка и практика применения выработанных правил и закреплённых за международными экономическими институтами задач в угоду организаторам и реализаторам глобалистических процессов.

Отсутствие своевременного противостояния вызовам и угрозам приводит к утрате возможности реализации национальных экономических интересов, к потере национального суверенитета и, более того, к непредсказуемым и неопределённым результатам в мировом масштабе.

Материалы и методы

Анализ проблем международных механизмов реализации национальных экономических интересов в современных геополитических условиях требует использования совокупности методов исследования: историко-логического, системного, факторного анализа, а также институциональных подходов, определяющих процесс формирования экономических институтов и их влияние на поведение людей и организаций.

Принцип национального суверенитета был провозглашен в середине XVII в. вследствие заключения в результате окончания Тридцатилетней войны в 1648 г. Вестфальского мира. Согласно данному документу главным субъектом международных отношений предстает суверенное государство, для которого государственные (национальные) интересы являются основным мотивом деятельности на международной арене [1].

На поверхности геоэкономических процессов суверенитет национального государства проявляется в форме устойчивого развития его социально-экономической системы, которое определяется в первую очередь степенью реализации национальных экономических интересов [2].

Реализация экономических интересов хозяйствующего субъекта зависит от взаимозависимости между перманентно возрастающими потребностями и присущими ему ресурсами. Расширяющийся спектр потребностей требует привлечения дополнительных, весьма ограниченных в природе и обществе ресурсов. Недостаточность ресурсов отдельных экономических субъектов возмещается за счет расширения системы экономических отношений, в которые он вступает и которые расширяют возможности привлечения дополнительных ресурсов. Развитие системы экономических отношений, в первую очередь за счет стихийного, а впоследствии регулярного обмена, обеспечило переход от натурального, патриархального хозяйства к рыночной экономике, базирующейся на развивающейся системе экономических отношений.

Вступление в сложившуюся в обществе систему экономических отношений позволяло субъекту использовать ресурсы других хозяйствующих субъектов и расширить возможность удовлетворения своих потребностей, а следовательно, и реализовывать экономические интересы.

Эта модель сформировалась и на мировой арене за счет зарождения и развития международных экономических отношений, обеспечивающих возможность использовать ресурсы разных стран в целях расширения возможностей реализации национальных экономических интересов государства. Вместе с тем процесс поиска необходимого партнера, ведение длительных переговоров, поиска компромиссов, адекватного варианта, удовлетворяющего обе стороны, был длительным и не всегда успешным. Шел поиск возможностей ускорить решение проблемы привлечения дополнительных ресурсов.

По мере развития мировой цивилизации сформировались различные способы преодоления дефицита ресурсов. К цивилизационным способам, несомненно, относятся международное разделение труда и внешняя торговля. Их развитие, расширение масштабов – длительные процессы, требующие учета интересов национальных государств, вступающих в международные экономические отношения.

Безусловно, долгие ожидания могут не устраивать правителей и возглавляемые ими народы. Желание сохранить власть, предотвратить народные

бунты зачастую просто голодных людей подталкивало к поиску быстрых решений. Главным способом быстрого решения проблемы со стороны более развитых, имеющих достаточно средств для победы в военных действиях стран становилось применение силы, развязывание войны. Вся история мировой цивилизации – движение от войны к войне на разных континентах.

Методы ведения войн менялись: осуществлялся постепенный переход от непосредственного вооруженного давления, захвата и грабежа колоний под страхом применения оружия до экономического давления посредством выкачивания ресурсов и навязывания грабительских условий торговых отношений. К началу XX в. Португалия, Испания, Великобритания, Франция, США, Германия и Австро-Венгрия поделили между собой 55 % территории и 35 % населения планеты, обогащаясь за счет вывоза ресурсов из стран Южной и Центральной Америки, Юго-восточной Азии, Юго-западной Африки, Индокитая, Океании [3, с. 63].

Лишенные достаточного количества сырьевых, материальных ресурсов в результате вывоза их в метрополии по баснословно низким ценам, а порой и вообще безвозмездно, без квалифицированных кадров из-за слабо развитой системы профессионального образования целые группы стран оказались в сложном экономическом и социальном положении. Противодействие различным вариантам разграбления для значительного числа стран было весьма ограниченным, а зачастую совершенно невозможным из-за отсутствия средств для экономического и военного противостояния этим процессам, а также из-за предательства национальных элит.

Первый шаг к формированию отношений государств на основе совместно выработанного международного права был сделан с началом распада колониальной, а затем и неоколониальной системы. В этих процессах особую роль сыграл Советский Союз. Стимулом к обострению национально-освободительной борьбы стала Великая Октябрьская революция. Активизации противостояния угнетенных народов способствовали победа во Второй мировой войне, образование мировой системы социализма и активная позиция СССР в ООН. Начиная с 1960 г., года принятия XV Сессией Генеральной Ассамблеи ООН по инициативе СССР «Декларации о предоставлении независимости колониальным странам и народам», до 1980-х гг. все документы этой организации, касающиеся освобождающихся народов, либо инициировались, либо активно поддерживались представителями социалистического блока [4].

Обсуждение

Современная геополитическая ситуация свидетельствует об обострении противостояния различных групп стран в процессе реализации национальных экономических интересов. Это явилось результатом распада колониальной системы в середине XX столетия, падения эффективности методов неокolonизма к началу XXI в., свертывания масштабов насильственной глобализации, пришедшей на смену неокolonизму.

Данные процессы положили начало трансформации международной системы экономических отношений, развертывающейся на основе определенных закономерностей:

– базирования международной экономической системы на сочетании экономической, военной, политической и идеологической власти различных стран;

- трансформации международных экономических институтов, обеспечивающих реализацию национальных интересов отдельных стран мира, в целях получения контроля над действиями других акторов международной системы;
- активного противоборства в процессе реализации национальных интересов группы стран, отражающего борьбу политических режимов и приносящих победу тем государствам, которые обладают большей мощью в экономической, финансовой, военной и других сферах;
- сосуществования ограниченного числа наиболее состоятельных стран с несовпадающими, порой диаметрально противоположными интересами [5–7];
- разрастания конфликта международных механизмов реализации национальных экономических интересов.

Механизмы реализации национальных интересов подразделяются на внутренние и внешние. Внутренние базируются на системе национальных экономических отношений, внешние – на системе международных экономических отношений. Результаты функционирования этих механизмов определяются степенью эффективности взаимодействия системы национальных и международных экономических институтов.

Данная зависимость неслучайна, поскольку экономические институты – результат процесса институционализации экономических интересов. На это положение указал А. Шоттер, который определял «экономику как науку, изучающую экономических агентов, преследующих свои собственные интересы, вызывая тем самым развитие институтов, способных удовлетворить их» [8].

История развития цивилизации показывает, что реальная реализация интересов достигается исключительно при экономии времени, выступающего в качестве объективного критерия этого процесса. Возможность сокращения издержек достигается благодаря объединению усилий экономических субъектов, определения стереотипного алгоритма действия, выработки модели поведения, обеспечивающих максимально возможный результат при минимальных затратах, следовательно, экономии времени.

Институционализация экономических интересов является следствием затруднения их реализации отдельными хозяйствующими субъектами. Стремление решить проблему дефицита ресурсов объединило хозяйствующих субъектов и предопределило возникновение экономических институтов, призванных создать условия для ее решения. Так возникли институционально оформленная собственность в различных формах, банки, страховые компании, образовательные учреждения различных уровней и т.д. [9].

Посредством деятельности Экономического и Социального совета ООН (ЭКОСОС), Всемирной торговой организации (ВТО), Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Группы организаций Всемирного банка, включающего пять организаций, в том числе Международный банк реконструкции и развития (МБРР), Международного валютного фонда (МВФ) и других международных экономических институтов на мировой арене реализуются связи функционирования национальных экономических интересов [10]. Благодаря их деятельности обеспечивается снижение транзакционных издержек, а следовательно, экономия времени, являющаяся критерием реализации экономических интересов.

Согласно уставным документам международные экономические институты призваны реализовывать задачи, обеспечивающие выработку единых

правил взаимодействия национальных государственных и бизнес-структур, что должно создавать благоприятные условия для реализации национальных интересов на мировой арене для всех стран-участниц международных экономических процессов. Важнейшие из этих задач:

- анализ и прогнозирование мировой экономики в целях выявления рисков и возможностей для национальных экономик;
- аккумулирование и предоставление статистических данных о мировой экономике, необходимых для анализа и принятия оптимальных решений;
- поддержка развития экономического и технического сотрудничества участников объединения;
- поощрение и ускорение экономической интеграции стран региона;
- содействие наращиванию объемов частных и иностранных инвестиций, международной торговли, поддержание платежных балансов: либерализация движения капиталов и торговли, обеспечение справедливой конкуренции;
- обсуждение и выработка рекомендаций по решению глобальных экономических, социальных и экологических проблем;
- урегулирование споров между государствами по проблемам внешнеэкономической и торговой политики;
- предоставление платформы для обмена опытом и координации внешнеэкономической деятельности государств [11–16].

В течение значительного периода эти задачи реализовывались с определенной степенью эффективности. В последние десятилетия ситуация изменилась. Распад Советского Союза, закрепление господства однополярного мира создали условия для присвоения отдельными международными субъектами исключительных прав при решении международных экономических проблем в ущерб другим государствам и установившемуся мировому порядку.

Результаты

Международные экономические институты фактически утратили возможность принимать оптимальные решения в соответствии с принципами организации их деятельности по ключевым, наиболее острым проблемам. Ряд стран, стоящих во главе глобализационных процессов, присвоили право принимать решения и осуществлять их реализацию в нарушение международных правил и в ущерб другим субъектам международных экономических отношений. В результате в течение последних лет обозначилась тенденция к разрастанию конфликта международных механизмов реализации национальных экономических интересов большинства стран мира, который проявляется через нерешенные проблемы функционирования международных экономических институтов.

Представляется, что конфликт международных механизмов реализации национальных экономических интересов – это столкновение противоположных целей, интересов, позиций хозяйствующих субъектов, не разрешаемых в правовом поле функционирования международных экономических институтов.

Конфликт международных механизмов реализации экономических интересов не только поражает мировую экономику, но и порождает геополитическую нестабильность, проявляющуюся в функциональных нарушениях деятельности международных институтов вследствие сознательного отхода от оптимальных методов решения их задач в угоду сильным в экономическом и военном противостоянии державам (табл. 1).

Таблица 1

Основные проблемы международных экономических институтов и проявление конфликта механизмов реализации национальных экономических интересов (составлено автором по данным работ [17–19])

Проблемы	Проявление конфликта механизмов
Неизменность структуры, устава и положений организаций, не отражающих динамичность международных процессов	Отсутствие адекватной своевременной адаптации к перманентным изменениям в международных экономических отношениях
Нежелание реформирования из-за угрозы утраты влияния определенных групп стран	Отсутствие консенсуса в группе ведущих держав, порождающее нестабильность в мировой экономике как угрозу реализации национальных интересов стран-участниц
Кризис системы принятия решений	Сдерживание процессов выработки и корректировки правил перемещения новых видов потоков: инвестиций, идей, ноу-хау, рабочей силы
Чрезмерная бюрократия, затрудняющая принятие решений и замедляющая процесс оказания помощи	Значительное замедление реализации функций генерирования новых правил, средств оказания помощи, востребованных меняющейся ситуацией
Протекционизм 2.0, порождающий новые формы, противоречащие принципам деятельности международных институтов	Отход от правил организаций, усиление международной конкуренции и борьбы за экономическое доминирование посредством силового давления и политического принуждения
Вольное толкование странами положений ГАТТ/ВТО о национальной безопасности	Тенденция к явному игнорированию норм ВТО, деформации функций организации
Усиление политического давления со стороны ведущих стран-членов, особенно крупных доноров	Влияние на принятие решений по распределению квот, финансирования, условиям займов и др. в ущерб странам-аутсайдерам
Усиление влияния политических интересов ведущих государств в ущерб экономическим	Разрастание масштабов санкционных войн, методов прямого политического и военного давления, снижающих эффективность международных механизмов при разрешении конфликтных ситуаций

Современный протекционизм – «протекционизм 2.0» – как политика защиты национальной экономики, местных производителей приобретает новые формы и методы:

- приспособление стран к новому этапу глобализации, который протекает в условиях усиления борьбы за экономическое доминирование;
- использование экономических санкций, которые не воспринимаются ВТО как ограничительные меры экономического характера;
- расширение масштабов применения нетарифных методов, методов непосредственного политического и военного давления;

– предъявление торгово-экономическим партнерам комплекта «обязательств», которые те якобы имеют в отношении более сильных стран;

– провозглашение суверенного права на проведение независимой внешнеэкономической политики, защищающей национальные интересы страны и фактически предполагающей собственное видение странами положений о национальной безопасности и расширение практики применения под этим предлогом торговых барьеров, что вызывает серьезные проблемы в международных отношениях [17];

– подрыв функционирования национальных экономик за счет непосредственного уничтожения важнейших производственных и военных объектов, обеспечивающих национальную безопасность страны-жертвы как основу реализации национальных экономических интересов. Примерами этой формы протекционизма служат Югославия, Ливия, Ирак, Сирия, а в реальном времени Иран. В отношении этих государств под предлогом ликвидации предполагаемой угрозы национальной безопасности стран, находящихся на значительном удалении, поставлена задача подчинения политико-экономического курса странам-реализаторам этой формы, в том числе за счет смены режима.

Одной из причин конфликта международных механизмов реализации национальных интересов, проявляющегося в форме неравенства стран-участниц международных организаций, является принцип долевого определения голосов при принятии решений в зависимости от квоты финансирования организации. Величина квоты – это имидж страны в организации, определяющий степень ее влияния на политику организации, на возможность защиты своих интересов при принятии важнейших решений. В табл. 2 представлены квоты США и России в ведущих международных экономических организациях.

Таблица 2

Квота России и США в международных организациях [20, с. 457]

Название организации	Величина квоты		Квота США / квота России, раз
	Россия	США	
Международный валютный фонд	2,7 %	16,1 %	5,96
Международный банк реконструкции и развития	2,98 %	15,7 %	5,27
Многостороннее агентство по гарантированию инвестиций (МАГИ)	3,13 %	58,4 %	18,66
Международная финансовая корпорация (МФК)	4,1 %	19,62 %	4,79
Международная ассоциация развития (МАР)	0,31 %	9,92 %	32

Самые большие разрывы квот США от российских – 18,66 и 32 раза – в МАГИ и МАР соответственно.

Значение квот определяется степенью их влияния на политику международных экономических организаций. Так, в МВФ 15-процентная квота позволяет блокировать практически любое решение. В 2021 г. США имели самую большую квоту в этих международных организациях из всех стран-участниц и, как следствие, самое большое количество голосов и исключительное влияние на принимаемые решения. Согласно данным табл. 3, доля голосов США

в МВФ в 2,7 раза превышает даже долю голосов Японии, находящейся по этому показателю на втором месте.

Таблица 3

Квоты финансирования и доли голосов стран в Международном валютном фонде (составлено автором по данным работы [14])

Страна	Квота	
	Абсолютное значение, млрд СДР	Доля голосов, %
США	83	16,5
Япония	30,8	6,14
ФРГ	26,6	5,31
Великобритания	20,16	4,03
Франция	20,16	4,03
Китай	30,5	6,08
Саудовская Аравия	10	2,01
Россия	12,9	2,59

Данная практика определяет неравноправное положение стран-участниц организации, поскольку все важнейшие решения принимаются в интересах более состоятельных стран, способных внести большую сумму в финансовый портфель организации. Ограбленные в колониальный и неоколониальный периоды государства не в состоянии конкурировать в этом процессе, получая доли голосов, которые даже в совокупности не позволяют оказывать влияние на принимаемые решения [21].

Преодоление острой формы конфликта международных механизмов реализации национальных экономических интересов тождественно решению проблем функционирования международных экономических, финансовых институтов. В этих целях необходимо:

- скорректировать деятельность международных экономических организаций, нацелив их функции на решение проблем, связанных с угрозами и вызовами, порожденными новыми геоэкономическими условиями, обеспечив консенсус в группе ведущих держав;

- преодолеть кризис принятия решения за счет обновления персонала организаций специалистами, владеющими современными технологиями работы с большими данными и обладающими навыками разработки и принятия стратегических решений в целях ускорения генерирования новых правил, востребованных меняющейся геоэкономической ситуацией;

- нивелировать негативное воздействие новых форм протекционизма, основанных на политических и военных методах давления;

- строго контролировать следование основополагающим принципам в деятельности организаций, исключив вольное толкование утвержденных норм, понятия «национальная безопасность» странами, преследующими свои цели и имеющими преимущественное число голосов при принятии решений;

- нивелировать давление финансово успешных стран, отказавшись от квотирования голосов на основе объема вносимых в организацию средств и перейдя к принципу «одна страна – один голос», преодолев экономическое доминирование посредством силового давления и политического принуждения;

– исключить возможность реализации политических интересов ведущих стран за счет противоправной деятельности международных экономических институтов, поставив заслон коррупционным схемам и обеспечив повышение эффективности международных механизмов реализации национальных интересов при разрешении конфликтных ситуаций.

Заключение

Развертывание глобализационных процессов поставило под угрозу процессы возрождения и сохранения суверенитета значительной массы национальных государств, возможностей реализации национальных экономических интересов, а следовательно, их социально-экономического развития. Глобализация закрепляет разные условия сосуществования стран мира, создав для одних благоприятные возможности жизнедеятельности, а для других – дополнительные вызовы за счет искажения функций международных экономических институтов, спровоцировав конфликт механизмов реализации национальных интересов в современной геоэкономической ситуации.

Сформировавшийся после распада СССР однополярный мир настойчиво предлагал отказаться от собственных традиций, национальных ценностей и следовать в фарватере идей, навязываемых идеологами однополярного мира, приобщаясь к новым экономическим правилам, а фактически отказаться от суверенитета, возможности реализовывать национальные интересы, а следовательно, обеспечить устойчивое развитие экономической системы.

Переход к многополярному миру, позволяющему преодолеть гегемонию одной или узкой группы стран, во многом определяется степенью эффективности деятельности международных экономических институтов, ответственных за благоприятный климат в мировой экономике. Выявленные проблемы в организации их деятельности позволили сформулировать направления по созданию благоприятных условий для всех стран-участниц международных экономических отношений, преодолению или по крайней мере смягчению конфликтов международных механизмов реализации их национальных экономических интересов.

Список литературы

1. Саямов Ю. Н. Вестфальский мир и его принципы вчера и сегодня // Век глобализации. 2018. № 3. С. 95–105.
2. Чернецова Н. С. Устойчивое развитие экономических систем как функция системы экономических интересов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 39–52. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-4
3. Чернецова Н. С., Именнова Л. С. Глобализация и реализация национальных экономических интересов // Вестник Российской международной академии туризма. 2024. № 4. С. 62–68.
4. СССР в борьбе против колониализма и неоколониализма 1960 – март 1986 гг. : документы и материалы : в 2 т. М. : Политиздат, 1986. 543 с.
5. Бирюкова О. В. Трансформация парадигмы торговой политики: теоретический и институциональный аспекты // Вопросы экономики. 2024. № 10. С. 142–155.
6. Гладков И. С. Международная торговля: трансформации в XXI веке // Таможенное регулирование. Таможенный контроль. 2021. № 7. С. 4–14.
7. Кошкарлова М. Б. Трансформация системы международных отношений: теоретические аспекты // Государственное управление и государственная служба. 2017. № 1 (60). С. 276–283.

8. Великая Отечественная война 1941–1945 годов : энциклопедия : в 12 т. М., 2011–2015.
9. Чернецова Н. С. Теория и методология исследования экономических интересов. М. : МИЭМ : УЧЛИТВУЗ, 2001. 205 с.
10. Панасенкова Т. В. Институционализация международных экономических отношений. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/institutsionalizatsiyamezhdu-narodnyh-ekonomicheskikh-otnosheniy> (дата обращения: 20.05.2025).
11. Всемирная торговая организация. URL: www.wto.org (дата обращения: 20.05.2025).
12. Группа Всемирного банка. URL: <https://www.vsemirnyjbank.org/ext/ru/home> (дата обращения: 20.05.2025).
13. Международный банк реконструкции и развития. URL: http://www.wehse.ru/cgi-bin/wpg/wehse_wpg_show_text_print.pl?term 1303728061 (дата обращения: 20.05.2025).
14. Международный валютный фонд (Справка). URL: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_organizations/mezhdunarodnyj-valutnyj-fond-mvf/1936877/ (дата обращения: 20.05.2025).
15. Организация экономического сотрудничества и развития. URL: <http://www.oecd.org/competition/> (дата обращения: 20.05.2025).
16. Экономический и Социальный совет ООН. URL: https://mid.ru/ru/foreign_policy/un/1946257/ (дата обращения: 20.05.2025).
17. Миловидов В. Д. Расшифровать Трампа: экономический подход // Проблемы национальной стратегии. 2018. № 1. С. 147–168.
18. Портанский А. П. Императив реформирования ВТО в эпоху роста протекционизма и торговых войн // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. 2019. Т. 14, № 2. С. 304–318. doi: 10.17323/1996-7845-2019-02-12
19. Портанский А. П. ВТО: накопившиеся проблемы и перспективы после МК-13 // Современная мировая экономика. 2024. Т. 2, № 1 (5). doi: 10.17323/2949-5776-2024-2-1-70-82
20. Бурденко Е. В. Ретроспективный анализ сотрудничества России с международными организациями с 1992 по 2021 год // Экономические отношения. 2022. Т. 12, № 3. С. 473–496. doi: 10.18334/eo 12.3.1166256
21. Schotter A. The Economic Theory of Social Institutions. Cambridge : Cambridge University Press, 1981.

References

1. Sayamov Yu.N. The Westphalian world and its principles yesterday and today. *Vek globalizatsii = The Age of Globalization*. 2018;(3):95–105. (In Russ)
2. Chernetsova N.S. Sustainable development of economic systems as a function of a system of economic interests. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):62–68. (In Russ)
3. Chernetsova N.S., Imennova L.S. Globalization and realization of national economic interests. *Vestnik Rossijskoj mezhdunarodnoj akademii turizma = Bulletin of the Russian International Academy of Tourism*. 2024;(4):62–68
4. *SSSR v bor'be protiv kolonializma i neokolonializma 1960 – mart 1986 gg.: dokumenty i materialy = The USSR in the struggle against colonialism and neocolonialism 1960 – March 1986: documents and materials: in 2 volumes*. Moscow: Politizdat. 1986:543. (In Russ)
5. Biryukova O.V. Transformation of the trade policy paradigm: theoretical and institutional aspects. *Voprosy ekonomiki = Economic issues*. 2024;(10):142–155. (In Russ)
6. Gladkov I.S. International trade: transformations in the 21st century. *Tamozhennoe regulirovanie. Tamozhennyj kontrol' = Customs regulation. Customs control*. 2021;(7):4–14. (In Russ)

7. Koshkarova M.B. Transformation of the system of international relations: theoretical aspects. *Gosudarstvennoe upravlenie i gosudarstvennaya sluzhba = Public administration and public service*. 2017;(1):276–283. (In Russ)
8. *Velikaya Otechestvennaya vojna 1941–1945 godov = The Great Patriotic War of 1941–1945: encyclopedia: in 12 volumes*. Moscow, 2011–2015. (In Russ)
9. Chernetsova N.S. *Teoriya i metodologiya issledovaniya ekonomicheskikh interesov = Theory and methodology of economic interests research*. Moscow: MIEM: UCh-LITVUZ, 2001:205. (In Russ)
10. Panasenkov T.V. *Institutsionalizatsiya mezhdunarodnykh ekonomicheskikh otnoshenij = Institutionalization of international economic relations*. (In Russ). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/institutsionalizatsiyamezhdu-narodnyh-ekonomicheskikh-otnosheniy> (accessed 20.05.2025).
11. *Vsemirnyaya torgovaya organizatsiya = The World Trade Organization*. (In Russ). Available at: www.wto.org (accessed 20.05.2025).
12. *Gruppa Vsemirnogo banka = The World Bank Group*. (In Russ). Available at: <https://www.vsemirnyjbank.org/ext/ru/home> (accessed 20.05.2025).
13. *Mezhdunarodnyy bank rekonstruktsii i razvitiya = International Bank for Reconstruction and Development*. (In Russ). Available at: http://www.wehse.ru/cgi-bin/wpg/wehse_wpg_show_text_print.pl?term 1303728061 (accessed 20.05.2025).
14. *Mezhdunarodnyy valyutnyy fond (Spravka) = International Monetary Fund (Reference)*. (In Russ). Available at: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_organizations/mezhdunarodnyy-valutnyy-fond-mvf-/1936877/ (accessed 20.05.2025).
15. *Organizatsiya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya = Organization for Economic Cooperation and Development*. (In Russ). Available at: <http://www.oecd.org/competition/>
16. *Ekonomicheskij i Sotsial'nyj sovet OON = The United Nations Economic and Social Council*. (In Russ). Available at: https://mid.ru/ru/foreign_policy/un/1946257/ (accessed 20.05.2025).
17. Milovidov V.D. Decipher Trump: an economic approach. *Problemy natsional'noj strategii = Problems of national strategy*. 2018;(1):147–168. (In Russ)
18. Portansky A.P. The imperative of WTO reform in the era of rising protectionism and trade wars. *Vestnik mezhdunarodnykh organizatsij: obrazovanie, nauka, novaya ekonomika = Bulletin of International Organizations: education, Science, new Economy*. 2019;14(2):304–318. (In Russ). doi: 10.17323/1996-7845-2019-02-12
19. Portansky A.P. WTO: accumulated problems and prospects after MK-13. *Sovremennaya mirovaya ekonomika = Modern world economy*. 2024;2(1). (In Russ). doi: 10.17323/2949-5776-2024-2-1-70-82
20. Burdenko E.V. A retrospective analysis of Russia's cooperation with international organizations from 1992 to 2021. *Ekonomicheskie otnosheniya = Economic relations*. 2022;12(3):473–496. (In Russ). doi: 10.18334/eo 12.3.1166256
21. Schotter A. *The Economic Theory of Social Institutions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.

Информация об авторах / Information about the authors

Надежда Сергеевна Чернецова

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

Nadezhda S. Chernetsova

Doctor of economical sciences, professor,
professor of the sub-department
of sociology, economic theory
and international processes,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 24.06.2025

Поступила после рецензирования/Revised 15.07.2025

Принята к публикации/Accepted 21.07.2025

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

И. О. Шифрин¹, А. И. Долотин², Г. В. Суровицкая³

^{1, 2, 3}Пензенский казачий институт технологий (филиал)
Московского государственного университета технологий и управления
имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Пенза, Россия
³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ishifrin2012@yandex.ru, ²alexivm@mail.ru, ³gvs_kachestvo@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На современном этапе темпы роста региональных экономик во многом определяются эффективностью инновационных проектов в электроэнергетической отрасли. Последняя функционирует в условиях высокого износа электрических сетей и оборудования, роста потребления электрической энергии потребителями, недостаточных объемов финансирования инвестиционных программ. Существующие модели оценки экономической эффективности инновационных проектов в электроэнергетике не обеспечивают приемлемую точность оценки потенциальных инновационных проектов с учетом параметров действующей инфраструктуры конкретного энергетического объекта. *Материалы и методы.* Для анализа современных оценочных подходов при рассмотрении инновационных проектов приняты во внимание их особенности и ограничения с учетом региональной составляющей и операционных факторов. Методологическую основу исследования составил комплексный подход, объединивший логический анализ для выявления причинно-следственных связей, экономический расчет эффектов и статистическую верификацию гипотез. Обработка данных включала консолидацию технико-экономических показателей ПАО «Россети Северо-Запад» за 2023 г. (потери энергии, тарифы, режимные характеристики) и последующий расчет эффектов с агрегацией в интегральный показатель. *Результаты.* Предложена модель оценки эффективности инновационных проектов в электроэнергетической отрасли, смещающая фокус оценки с неопределенных прогнозов на измеримые параметры и базирующаяся на определении увеличения капитальных затрат и снижения эксплуатационных и операционных затрат в условиях реализации проекта. *Выводы.* Использование модели позволит пересмотреть традиционные подходы к оценке инновационных проектов по внедрению интеллектуальных электрических систем в условиях недостаточных сведений об их возможной окупаемости.

Ключевые слова: региональная экономика, электроэнергетика, Smart Grids, инновационный проект, эффективность, модель оценки

Для цитирования: Шифрин И. О., Долотин А. И., Суровицкая Г. В. Модель оценки эффективности инновационных проектов в электроэнергетической отрасли // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 78–88. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-6

A MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE PROJECTS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

I.O. Shifrin¹, A.I. Dolotin², G.V. Surovitskaya³

^{1, 2, 3}Penza Cossack Institute of Technology (branch) of the K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University), Penza, Russia

³Penza State University, Penza, Russia

¹ishifrin2012@yandex.ru, ²alexivm@mail.ru, ³gvs_kachestvo@inbox.ru

Abstract. *Background.* At the present stage, the growth rates of regional economies are largely determined by the effectiveness of innovative projects in the electric power industry. The latter operates in conditions of high wear and tear of electrical networks and equipment, increased consumption of electric energy by consumers, and insufficient financing of investment programs. Existing models for assessing the economic efficiency of innovative projects in the electric power industry do not provide acceptable accuracy in assessing potential innovative projects, taking into account the parameters of the existing infrastructure of a particular energy facility. *Materials and methods.* To analyze modern evaluation approaches, when considering innovative projects, their features and limitations are taken into account, taking into account the regional component and operational factors. The methodological basis of the study was an integrated approach that combined logical analysis to identify cause-and-effect relationships, economic calculation of effects, and statistical verification of hypotheses. The data processing included the consolidation of technical and economic indicators of PJSC ROSSETI North-West for 2023 (energy losses, tariffs, operating characteristics) and the subsequent calculation of effects with aggregation into an integral indicator. *Results.* A model for evaluating the effectiveness of innovative projects in the electric power industry is proposed, shifting the focus of evaluation from uncertain forecasts to measurable parameters and based on determining the increase in capital expenditures and reduction of operating and operating costs in the context of the project. *Conclusions.* Using the model will make it possible to review traditional approaches to evaluating innovative projects for the introduction of intelligent electrical systems in conditions of insufficient information about their possible payback.

Keywords: regional economy, electric power industry, Smart Grids, innovation project, efficiency, evaluation model

For citation: Shifrin I.O., Dolotin A.I., Surovitskaya G.V. A model for evaluating the effectiveness of innovative projects in the electric power industry. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):78–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-6

Введение

На современном этапе экономическое развитие субъектов Российской Федерации зависит от темпов инновационного развития ключевых отраслей, к которым следует отнести электроэнергетическую отрасль, являющуюся основой для функционирования экономики страны и региона.

Электротехника включает в себя комплекс экономических отношений, возникающих в процессе производства и передачи электрической энергии, оперативно-диспетчерского управления, сбыта и потребления электрической энергии с использованием производственных и иных имущественных объектов, принадлежащих на праве собственности или на ином предусмотренном

федеральными законами основаниями субъектам электроэнергетики или иным лицам [1].

Эффективность инновационной деятельности в энергетической отрасли напрямую определяет инвестиционную привлекательность региона и устойчивость роста региональной экономики. Между уровнем инновационного развития энергетики и динамикой региональной экономики существует устойчивая причинно-следственная связь с выраженным мультипликативным эффектом [2, 3].

Наиболее актуальными для достижения эффективности энергетических систем в настоящее время являются инновационные проекты с использованием цифровых технологий. Высокая результативность инновационных цифровых решений в энергосистемах подтверждает роль цифровизации как ключевого фактора стимулирования инноваций и адаптации [4–7]. Наиболее востребованными на текущем этапе являются такие сквозные цифровые технологии, как интернет вещей, искусственный интеллект, большие данные, блокчейн [8].

В целях повышения эффективности управления электроэнергетическими системами принимаются программы инновационного развития энергетических компаний. На основании этих программ определяются основные направления реализации инновационных проектов для их ранжирования и выявления проектов, результат которых может иметь значимый потенциал достижения эффективности.

Реализация инновационных проектов ПАО «Россети Северо-Запад» осуществляется в соответствии с программой инновационного развития, направленной на получение экономического эффекта от внедрения инноваций [9]. К инновационным решениям, которые могут быть внедрены в электросетевом комплексе ПАО «Россети Северо-Запад» и отражены в технологическом реестре по основным направлениям инновационного развития, отнесены внедрение цифровых подстанций, переход к цифровым активно-адаптивным сетям, переход к комплексной эффективности бизнес-процессов и автоматизации систем управления, применение новых технологий и материалов в электроэнергетике, сквозные технологии [10].

К перспективным инновационным решениям, способствующим повышению эффективности управления энергетическими системами на стадии перехода к высокоавтоматизированным сетям, следует отнести высокоавтоматизированную распределительную сеть Smart Grid, представляющую собой динамическую систему генерации, передачи и потребления энергетических ресурсов, основанную на автоматизированных и интерактивных процессах, а также осуществляющую передачу информационных потоков в режиме онлайн [11, 12]. Внедрение Smart Grid является важным направлением инновационного развития ПАО «Россети» и его дочерних сообществ.

Ключевое значение при принятии решений о внедрении инновационных продуктов отводится оценке их эффективности. В состав модели оценки эффективности инновационных проектов включаются экономические, бюджетные, конъюнктурные, научно-технические, информационные, экологические, ресурсные и социальные показатели [13]. Для определения глобальных приоритетов инновационных проектов и последующего их ранжирования в моделях оценки учитываются такие критерии, как объем инвестиций, срок окупаемости, расходы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, доля займа в инвестициях, соответствие проекта потребностям рынка [14].

Для оценки эффективности инновационных проектов в электроэнергетической отрасли наиболее значимыми являются экономические показатели, поскольку рост эффективности функционирования энергетического оборудования после внедрения инноваций должен обеспечить снижение издержек и повышение уровня прибыли. Такие показатели, как чистый приведенный доход, внутренняя норма рентабельности, дисконтируемый срок окупаемости инвестиций, индекс прибыльности и коэффициент эффективности инвестиций, являются значимыми показателями модели оценки эффективности инновационных проектов. Однако по отдельности они не отражают эффекты от внедрения инновационных проектов с учетом капитальных затрат, эксплуатационных и операционных издержек, что делает их оценку недостаточной для принятия решения о начале реализации проектов.

С другой стороны, из-за отсутствия достоверных оценок будущих параметров конкретной электрической сети (потребление электроэнергии, стоимость обслуживания и т.д.) сложно спрогнозировать и оценить эффективность новых инновационных проектов. Не гарантирована достоверная оценка окупаемости при расчете их эффективности с учетом результатов уже реализованных инновационных проектов. В связи с этим возрастает риск невозврата вложенных инвестиционных средств на реализацию инновационных проектов. Сказанное выше обуславливает целесообразность актуализации модели оценки эффективности инновационных проектов, реализуемых в электрических сетях электроэнергетической отрасли.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выделено ПАО «Россети Северо-Запад», деятельность которого осуществляется на территории семи регионов Северо-Западного федерального округа (Республика Карелия, Республика Коми, Архангельская, Вологодская, Мурманская, Новгородская, Псковская области).

Исследуемая выборка охватывала решения, утвержденные в технологическом реестре ПАО «Россети» по ключевым направлениям инновационного развития.

Анализ особенностей моделей оценки реализован с применением общенаучных методов систематизации актуальных подходов, сравнительного анализа результатов апробации и обобщения выводов для формирования рекомендаций.

Методологическую основу составил комплексный подход, объединяющий логический анализ для выявления причинно-следственных связей, экономический расчет эффектов и статистическую верификацию гипотез. Обработка данных включала консолидацию технико-экономических показателей (потери энергии, тарифы, режимные характеристики) и последующий расчет эффектов с агрегацией в интегральный показатель.

В результате предложена авторская модель расчета инновационного эффекта, синтезирующая оценку снижения эксплуатационных затрат и операционных издержек с учетом роста капитальных вложений.

Апробация предложенной модели проведена на данных ПАО «Россети Северо-Запад» за 2023 г. При этом для типового объекта мощностью 5000 кВт с потерями электроэнергии 5,83 % и тарифом 1,71 руб./кВт·ч подтверждена

практическая применимость модели. Полученные результаты сопоставлены с традиционными аналогами для верификации точности.

Результаты и обсуждение

По мнению авторов, наиболее значимыми показателями эффективности инновационной программы развития вообще и инновационного проекта в частности являются показатели снижения операционных издержек и сокращения доли потерь электроэнергии.

При оценке инновационного (инвестиционного) проекта важно определить, какой эффект будет достигнут при его реализации в условиях роста капитальных затрат и снижения операционных и эксплуатационных издержек. Для этого показатель снижения удельных операционных издержек [11] может быть оценен по формуле

$$\text{ОРЕХ}_{\text{ПИР}} = k_1 \cdot D_{\text{ЗВИР}} \cdot \text{ОРЕХ}_{\text{КОРП}}, \quad (1)$$

где k_1 – инновационный коэффициент для $\text{ОРЕХ}_{\text{ПИР}} - 0,2$; $D_{\text{ЗВИР}}$ – доля затрат на внедрение инновационных решений в объеме инвестиционной программы; $\text{ОРЕХ}_{\text{КОРП}}$ – отношение подконтрольных затрат к количеству условных единиц оборудования, тыс. руб./шт.

Показатель снижения доли потерь электроэнергии к объему отпуска электроэнергии из сети [11] определяется формулой

$$\Delta W_{\text{ПИР}} = k_4 \cdot D_{\text{ЗВИР}} \cdot \Delta W_{\text{ЭЭ}}, \quad (2)$$

где k_4 – инновационный коэффициент для определения изменения потерь энергии – 0,121; $\Delta W_{\text{ЭЭ}}$ – доля потерь электроэнергии к общему отпуску в сеть за отчетный период.

Вышеуказанные показатели отражают результат реализованных инновационных решений в электросетевом комплексе. Причем такая оценка является общей для всей программы инновационного развития.

Для принятия решения о внедрении инновационных решений, в частности, необходимо осуществлять оценку инновационного проекта относительно традиционного. С этой целью следует учитывать разницу в показателях капитальных затрат, операционных и эксплуатационных издержек, относящихся к инновационным и традиционным проектам.

Тогда предлагаемая модель оценки эффективности инновационного проекта в электроэнергетической отрасли имеет следующий вид.

Эффект от снижения потерь электроэнергии после реализации инновационного проекта может определяться по формуле

$$\mathfrak{E}_1 = \frac{\Delta Z_{\text{ЭИН}} - \Delta Z_{\text{КИ-Т}}}{\Delta Z_{\text{КИ-Т}}}, \quad (3)$$

где $\Delta Z_{\text{ЭИН}}$ – снижение эксплуатационных затрат от внедрения инновационного проекта; $\Delta Z_{\text{КИ-Т}}$ – увеличение капитальных затрат от внедрения инновационного проекта.

Снижение эксплуатационных затрат от внедрения инновационного проекта может быть оценено по формуле

$$\Delta Z_{\text{ЭИН}} = k_4 \cdot D_{\text{ЗВИР}} \cdot \Delta W_{\text{ЭЭ}} \cdot P \cdot \Delta P \cdot \tau \cdot T \cdot t, \quad (4)$$

где P – максимальная мощность потребителей, кВт; ΔP – потери электроэнергии, %; τ – число часов использования максимума нагрузки, ч; T – тариф на передачу электроэнергии, руб./кВт·ч; t – жизненный цикл инновационного объекта, лет.

Увеличение капитальных затрат на внедрение инновационного проекта определится формулой

$$\Delta Z_{\text{КИ-Т}} = Z_{\text{КИ}} - Z_{\text{КТ}}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{КИ}}$ – капитальные затраты на инновационный проект, тыс. руб.; $Z_{\text{КТ}}$ – капитальные затраты на аналогичный традиционный проект, тыс. руб.

Эффект от снижения операционных издержек после реализации инновационного проекта может определяться по формуле

$$\Theta_2 = \frac{Z_{\text{С}} + Z_{\text{уд.ОТ}} \cdot n - Z_{\text{С}} - Z_{\text{уд.ОИ}} \cdot n}{Z_{\text{С}} + Z_{\text{уд.ОТ}} \cdot n}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{уд.ОТ}}$ – удельные операционные затраты на обслуживание единицы традиционного оборудования, тыс. руб./шт.; $Z_{\text{уд.ОИ}}$ – удельные операционные затраты на обслуживание единицы инновационного оборудования, тыс. руб./шт.; $Z_{\text{С}}$ – строительные затраты (фундамент, блочно-модульное здание и т.п.), тыс. руб.; n – количество эксплуатируемого оборудования, шт.

Эквивалентный результирующий эффект от внедрения инновационного проекта:

$$\Theta = \Theta_1 \cdot \frac{\Theta_2}{k_{\text{прив}}}, \quad (7)$$

где $k_{\text{прив}}$ – коэффициент приведения эффектов от снижения операционных и эксплуатационных издержек, равный

$$k_{\text{прив}} = \frac{Z_{\text{С}} + Z_{\text{уд.ОТ}} \cdot n \cdot t}{\Delta Z_{\text{КИ-Т}}}. \quad (8)$$

В целях демонстрации преимуществ предлагаемой модели оценки применим формулы (3)–(8) к анализу данных годового отчета ПАО «Россети Северо-Запад» по итогам работы за 2023 г.

За максимальную мощность потребителя примем 5000 кВт с годовым числом часов использования максимума нагрузки 5500 ч. Средние потери электроэнергии за 2023 г. составили 5,83 % при среднем за год тарифе на передачу электроэнергии 1,71 руб./кВт·ч. Жизненный цикл инновационного объекта – 30 лет. В качестве расчетного объекта используем инновационные ячейки, устанавливаемые совместно с распределительной трансформаторной подстанцией с двумя секциями шин с номинальным напряжением 10 кВ для электроснабжения потребителей 2 категории надежности электроснабжения.

Определим снижение эксплуатационных затрат от инновационного оборудования по формуле (4):

$$\Delta Z_{\text{ин}} = 0,121 \cdot 0,85 \cdot 5000 \cdot 0,583 \cdot 5500 \cdot 1,71 \cdot 30 = 8459 \text{ тыс. руб.}$$

Увеличение капитальных затрат на внедрение инновационного оборудования следует учитывать с затратами на остальную часть объекта: фундамент, контур заземления, блочно-модульное здание и т.д. Это позволит учесть эффект от меньших габаритных размеров инновационных ячеек относительно традиционных в строительной части проекта и, как следствие, в процессе расчета учесть снижение инвестиционных затрат на традиционное оборудование и материалы объекта при совместной реализации с инновационным оборудованием. Подставляя значения в формулу (5), получим увеличение капитальных затрат:

$$\Delta Z_{\text{ки-т}} = 35\,200 - 28\,800 = 6400 \text{ тыс. руб.}$$

Эффект от снижения потерь электроэнергии после реализации инновационного проекта согласно формуле (3):

$$\Theta_1 = \frac{8459 - 6400}{6400} = 0,32.$$

Обслуживание инновационных ячеек в процессе эксплуатации не требуется. Затраты на обслуживание традиционных ячеек приняты на основе стоимости услуг по техническому и эксплуатационно-ремонтному обслуживанию ПАО «Россети Северо-Запад».

Эффект от снижения операционных издержек после реализации инновационного проекта согласно формуле (6) будет следующим:

$$\Theta_2 = \frac{61\,920 + 13\,663 \cdot 18 - 61\,920}{61\,920 + 13\,663 \cdot 18} = 0,8.$$

Коэффициент приведения эффектов от затрат по формуле (8):

$$k_{\text{прив}} = \frac{61\,920 + 13\,633 \cdot 18 \cdot 30}{6\,400\,000} = 1,15.$$

Эквивалентный результирующий эффект от внедрения инновационного проекта на основании формулы (7) составит

$$\Theta = 0,32 + \frac{0,8}{1,15} = 1,02.$$

В результате проведенного расчета результирующий эффект от внедрения инновационного оборудования составляет 102 % относительно традиционного оборудования на всем жизненном цикле объекта.

Полученные результаты убедительно демонстрируют, что снижение операционных издержек и сокращение потерь электроэнергии выступают ключевыми индикаторами эффективности инновационных проектов в электроэнергетической отрасли. Предложенная модель оценки эффективности инновационного проекта за счет интеграции ретроспективных данных

(фактические потери, тарифы) и объективных технико-экономических показателей (мощность, жизненный цикл, габариты оборудования) не имеет недостатков традиционных подходов. Верификация модели на примере инновационных ячеек в условиях статистических данных ПАО «Россети Северо-Запад» подтвердила ее практическую значимость: расчетный эквивалентный эффект в 102 % доказывает окупаемость даже при росте капитальных затрат, причем 64 % совокупного эффекта обеспечивается именно снижением потерь энергии. Это подтверждает целесообразность использования предлагаемой модели для принятия решения о реализации инновационного проекта.

Необходимо подчеркнуть, что точность оценок по предложенной модели критически зависит от доступности и достоверности входных данных (тарифы, срок службы). Перспективными направлениями развития модели, по мнению авторов, являются ее адаптация для проектов возобновляемых источников энергии и интеллектуальных сетей, а также интеграция вероятностных методов оценки нагрузки.

Заключение

Таким образом, предложенная модель оценки эффективности инновационных проектов в энергетической отрасли представляет собой инструмент, смещающий фокус оценки с неопределенных прогнозов на измеримые параметры, что снижает инвестиционные риски и позволяет энергокомпаниям обоснованно ранжировать инновационные проекты, оптимизируя структуру инвестиционных программ на основе приоритетности (в разнице капитальных затрат, с одной стороны, и эксплуатационных, операционных затрат – с другой).

На основе определения разницы в капитальных, операционных и эксплуатационных затратах на внедрение инновационного оборудования относительно традиционного при использовании разработанной модели получен результирующий эффект, который и отражает оценку эффективности инновационного проекта.

Модель оценки эффективности инновационных проектов обеспечит энергетическим компаниям возможность рационально принимать решение о внедрении инновационных проектов, что, в свою очередь, позволит повысить эффективность функционирования отрасли электроэнергетики в целом и увеличить объем прибыли энергетических компаний в частности. Вместе с тем развитие инноваций в электроэнергетической отрасли создает благоприятные условия для формирования инновационного потенциала экономики региона, в границах которых осуществляется функционирование энергетических компаний. Положительное влияние инновационного развития с макроэкономической точки зрения обеспечит рост пополнения доходной части региональных бюджетов и экономическое развитие регионов.

Список литературы

1. Об электроэнергетике : федер. закон № 35-ФЗ от 26.03.2003 (ред. от 25.10.2024).
2. Мельмонт Д. Д. Внедрение инноваций как фактор повышения экономической безопасности регионов // Креативная экономика. 2025. № 4. С. 925–942. doi: 10.18334/ce.19.4.122971

3. Воскресенская О. В. Инновационный потенциал России, ее регионов и отраслей // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2024. № 11-1. С. 17–24. doi: 10.17513/vaael.3815
4. Шагеев А. Э. Цифровые инновации в современном мире: отличительные черты, предпосылки и возможности использования // Траектории развития пространственных систем: ESG-вызовы и инновационные модели. 2023. С. 845–848.
5. Колосок И. Н., Коркина Е. С. Применение технологии граничной аналитики (Edge Analytics) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 28–39. doi: 10.38028/ESI.2021.23.3.003
6. Корытко С. А., Лиманова Н. И. О новых подходах организации ИТ-инфраструктуры электросетевого комплекса в условиях цифровой трансформации // Молодой ученый. 2021. № 5 (347). С. 9–11.
7. Ляндау Ю. В., Темирбулатов А. У. Обзор применения технологий искусственного интеллекта в электроэнергетической отрасли // Инновации и инвестиции. 2023. № 8. С. 304–309. doi: 10.24160/0013-5380-2024-11-4-8
8. Баринаева В. А., Девятова А. А., Ломов Д. Ю. Роль цифровизации в глобальном энергетическом переходе и в российской энергетике // Вестник международных организаций. 2021. Т. 16, № 4. doi: 10.17323/1996-7845-2021-04-06
9. Программа инновационного развития ПАО «Россети Северо-Запад» на период 2020–2024 гг. с перспективой до 2030 г.
10. Технологический реестр по основным направлениям инновационного развития ПАО «Россети».
11. Деньжаков С. Ю., Одинокоев А. А., Шариков И. А., Витушкин Д. О. Интеллектуальная энергетика как перспектива роста экономики // Актуальные исследования. 2021. № 9 (36). С. 6–9.
12. Тебиева С. А., Лигостаев А. О. Разработка интеллектуальной системы контроля и потребления электроэнергии // Молодой ученый. 2021. № 4 (346). С. 46–48.
13. Зайнуллина Д. Р. Формирование критериев оценки эффективности инновационных проектов // Вопросы инновационной экономики. 2021. № 2. С. 801–818. doi: 10.18334/vinec.11.2.112223
14. Цапенко М. В., Романова О. Е. Экспертная модель оценки инновационных проектов нефтегазовой отрасли // Математические модели современных экономических процессов, методы анализа и синтеза экономических механизмов. Актуальные проблемы и перспективы менеджмента организаций в России : сб. ст. XV Всерос. науч.-практ. конф. / гл. ред. Д. А. Новиков ; Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова ; Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2023. С. 54–60.

References

1. *About the electric power industry: feder. Law № 35-FZ of 26.03.2003 (as amended on 25.10.2024).* (In Russ.)
2. Melmont D.D. Introduction of innovations as a factor of increasing the economic security of regions. *Kreativnaya ekonomika = Creative economy*. 2025;(4):925–942. (In Russ) doi: 10.18334/ce.19.4.122971
3. Voskresenskaya O.V. The innovative potential of Russia, its regions and industries. *Vestnik Altajskoj akademii ekonomiki i prava = Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2024;(11):17–24. (In Russ). doi: 10.17513/vaael.3815
4. Shageev A.E. Digital innovations in the modern world: distinctive features, prerequisites and possibilities of use. *Traektorii razvitiya prostranstvennykh sistem: ESG-vyzovy i innovatsionnye modeli = Spatial systems Development trajectories: ESG challenges and innovative models*. 2023:845–848. (In Russ)

5. Kolosok I.N., Korkina E.S. The use of Edge Analytics technology in creating digital counterparts of UES facilities in Russia. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2021;(3):28–39. (In Russ). doi: 10.38028/ESI.2021.23.3.003
6. Korytko S.A., Limanova N.I. On new approaches to the organization of IT infrastructure of the electric grid complex in the context of digital transformation. *Molodoj uchenyj = Young scientist*. 2021;(5):9–11. (In Russ)
7. Lyandau Yu.V., Temirbulatov A.U. Review of the application of artificial intelligence technologies in the electric power industry. *Innovatsii i investitsii = Innovations and investments*. 2023;(8):304–309. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380-2024-11-4-8
8. Barinova V.A., Devyatova A.A., Lomov D.Yu. The role of digitalization in the global energy transition and in the Russian energy sector. *Vestnik mezhdunarodnykh organizatsij = Bulletin of International Organizations*. 2021;16(4). (In Russ). doi: 10.17323/1996-7845-2021-04-06
9. *Programma innovatsionnogo razvitiya PAO «Rosseti Severo-Zapad» na period 2020–2024 gg. s perspektivoj do 2030 g = The program of innovative development of PJSC ROSSETI North-West for the period 2020–2024 with a view to 2030*. (In Russ)
10. *Tekhnologicheskij reestr po osnovnym napravleniyam innovatsionnogo razvitiya PAO «Rosseti» = Technological register on the main directions of innovative development of PJSC ROSSETI*. (In Russ)
11. Denzhakov S.Yu., Odinokov A.A., Sharikov I.A., Vitushkin D.O. Intelligent energy as an economic growth perspective. *Aktual'nye issledovaniya = Relevant research*. 2021;(9):6–9. (In Russ)
12. Tebieva S.A., Ligostaev A.O. Development of an intelligent system for monitoring and consumption of electricity. *Molodoj uchenyj = Young scientist*. 2021;(4):46–48. (In Russ)
13. Zainullina D.R. Formation of criteria for evaluating the effectiveness of innovative projects. *Voprosy innovatsionnoj ekonomiki = Issues of innovative economics*. 2021;(2):801–818. (In Russ). doi: 10.18334/vinec.11.2.112223
14. Tsapenko M.V., Romanova O.E. An expert model for evaluating innovative projects in the oil and gas industry. *Matematicheskie modeli sovremennykh ekonomicheskikh protsessov, metody analiza i sinteza ekonomicheskikh mekhanizmov. Aktual'nye problemy i perspektivy menedzhmenta organizatsij v Rossii: sb. st. XV Vseros. nauch.-prakt. konf = Mathematical models of modern economic processes, methods of analysis and synthesis of economic mechanisms. Actual problems and prospects of management of organizations in Russia: collection of Articles XV of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Samara: Izd-vo SamNTs RAN, 2023:54–60. (In Russ)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Олегович Шифрин

старший преподаватель кафедры
энергетики, Пензенский казачий
институт технологий (филиал)
Московского государственного
университета технологий
и управления имени
К. Г. Разумовского (Первый
казачий университет)
(Россия, г. Пенза, ул. Гагарина,
стр. 11Ш/1)
E-mail: ishifrin2012@yandex.ru

Igor O. Shifrin

Senior lecturer of the sub-department
of energy, Penza Cossack Institute
of Technology (branch) of the
K.G. Razumovsky Moscow State University
of Technology and Management
(First Cossack University)
(11Sh/1 Gagarin street, Penza, Russia)

Алексей Иванович Долотин

кандидат технических наук,
доцент кафедры энергетики,
Пензенский казачий институт
технологии (филиал) Московского
государственного университета
технологий и управления имени
К. Г. Разумовского (Первый
казачий университет)
(Россия, г. Пенза, ул. Гагарина,
стр. 11Ш/1)
E-mail: alexivm@mail.ru

Alexey I. Dolotin

Candidate of technical sciences, associate
professor of the sub-department of energy,
Penza Cossack Institute of Technology
(branch) of the K.G. Razumovsky
Moscow State University of Technology
and Management (First Cossack University)
(11Sh/1 Gagarin street, Penza, Russia)

Галина Владимировна Суровицкая

доктор экономических наук, доцент,
начальник отдела менеджмента качества,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
профессор,
Пензенский казачий институт
технологии (филиал)
Московского государственного
университета технологий
и управления имени К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет)
(Россия, г. Пенза, ул. Гагарина,
стр. 11Ш/1)
E-mail: gvs_kachestvo@inbox.ru

Galina V. Surovitskaya

Doctor of economical sciences,
associate professor,
head of quality management department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
professor,
Penza Cossack Institute of Technology
(branch) of the K.G. Razumovsky
Moscow State University of Technology
and Management (First Cossack University)
(11Sh/1 Gagarin street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 30.06.2025

Поступила после рецензирования/Revised 28.07.2025

Принята к публикации/Accepted 12.08.2025

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 004.023
doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-7

РАЗДЕЛЕНИЕ ОЧЕРЕДЕЙ КАК МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ РАСПИСАНИЯ МНОГОСТАНОЧНОГО ЦЕХА РАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА СО СБОРОЧНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ

М. А. Иванов

НефтемашСистема, Саратов, Россия
mikeaivanov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается применение алгоритма муравьиной колонии для решения задачи составления расписания для цеха единичного производства со сборочными операциями (assembly job shop). Он дает хорошие результаты, однако из-за высокой вычислительной сложности слабо подходит для решения реальных практических задач с размерностью в сотни и тысячи операций. *Материалы и методы.* Предлагается метод существенного повышения вычислительной эффективности данного алгоритма применительно к многостаночной задаче – наиболее часто встречающемуся на практике случаю. Он состоит в разделении единой очереди работ на отдельные очереди по типам используемых станков и применении алгоритма муравьиной колонии к каждой из них по отдельности. *Результаты.* Показывается, что на крупных (тысячи операций) задачах временные затраты сокращаются в 10 и более раз без потери качества находимых решений. *Выводы.* Предложенная модификация позволяет существенно улучшить производительность алгоритма муравьиной колонии при практическом применении для решения производственных задач машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: расписание производства, цех единичного производства со сборками, метод муравьиной колонии, метаэвристические методы, многоуровневые сборки

Благодарности: автор благодарит за ценные замечания к.т.н. П. В. Матренина.

© Иванов М. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Иванов М. А. Разделение очередей как метод оптимизации алгоритма муравьиной колонии при построении расписания многостаночного цеха разового производства со сборочными операциями // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 89–101. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-7

QUEUE SEPARATION AS A METHOD OF OPTIMIZATION OF ANT COLONY ALGORITHM FOR MULTI-MACHINE ASSEMBLY JOB SHOP SCHEDULING

M.A. Ivanov

NeftemashSistema, Saratov, Russia
mikeaivanov@gmail.com

Abstract. *Background.* Ant Colony Algorithm is an effective method of solving assembly job shop problem. But its computational complexity makes it impractical for real-life tasks of hundreds and thousands of operations. *Materials and methods.* This article describes a method to significantly increase computational effectiveness of the algorithm for multi-machine problem – the most important case for practical use. The proposed method uses separation of the task queue into a number of subqueues for each type of the processing machines and applying Ant Colony Optimization to each of them separately. *Results.* It is shown that for large-scale problems (thousands of operations) runtime decreases 10 times or more without losing the quality of solutions. *Conclusions.* This modification significantly increases ACO algorithm speed when applied to practical tasks of machine manufacturing plants.

Keywords: assembly job shop, assembly job shop scheduling, ant colony optimization, metaheuristics, multi-level assemblies

Acknowledgements: the author thanks P. V. Matrenin, candidate of technical sciences, for his valuable comments.

For citation: Ivanov M.A. Queue separation as a method of optimization of ant colony algorithm for multi-machine assembly job shop scheduling. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):89–101. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-7

Введение

Сокращение сроков производства продукции – один из важных факторов конкурентоспособности предприятия. Одним из способов достижения этого является оптимизация порядка производства деталей и узлов. Задача составления расписания производства является NP-сложной, и однозначного алгоритма ее оптимального решения не существует. Ее двумя основными подвидами являются задачи о цехе разового (job shop) и поточного производства (flow shop). В первом случае на последовательность операций никакого ограничения не накладывается, во втором считается, что порядок прохождения станков для всех деталей одинаков (некоторые станки при этом могут быть пропущены). Более сложным вариантом данных задач являются задачи со сборочной стадией (assembly job / flow shop). В таких задачах предполагается, что после изготовления детали поступают на сборочную операцию, в рамках которой объединяются в узлы; те, в свою очередь, могут служить комплектующими для узлов более высокого уровня. Мы рассматриваем вариант, когда количество уровней сборки заранее неизвестно и неограниченно. Обычно считается,

что сборка может начаться только после того, как готовы все детали; на практике это не всегда так, но далее мы будем придерживаться данного допущения.

Правила диспетчирования были первым, вычислительно наиболее простым методом решения задачи составления расписания. Такие правила вычисляют приоритеты выполнения операций, исходя из их продолжительности и общего числа операций, нужных для изготовления детали. Изучение подобных подходов провели, например, Фрай (с соавт.) [1] и Филиппум (с соавт.) [2], рассмотрев некоторые правила диспетчирования для задачи минимизации времени изготовления и совокупного запаздывания. Доктор (с соавт.) [3] разработал эвристический алгоритм, оптимизировавший расписание для изготовления изделий с не более чем тремя уровнями сборочных единиц. МакКой и Эгбелу [4] и Парк и Ким [5] разработали эвристические процедуры решения задачи оптимизации изготовления двухуровневого изделия. Мун-Вон и Ким [6] разработали модель на основе частично-целочисленного линейного программирования и алгоритм по методу ветвей и границ, находивший оптимальные решения случайно сгенерированных двухуровневых задач умеренного размера. Риджа и Раджендран [7] предложили концепцию синхронизации операций по дате (OSD): расписание должно составляться так, чтобы изготовление деталей, входящих в одну сборку, завершалось как можно более синхронно. Цао (с соавт.) предложил метод составления расписания инвертированием дерева изделия [8].

Важным достоинством правил диспетчирования является их низкая вычислительная сложность. Однако, как показали Омкумар и Шахабудин [9], все они уступают в качестве получаемых решений методу муравьиной колонии. Для решения задачи составления расписания используют и другие итеративные методы, например генетические алгоритмы, метод симулирования отжига и т.п., но они не всегда хорошо справляются с ограничениями, появляющимися, если мы рассматриваем многоуровневую сборочную структуру. Важным достоинством метода муравьиной колонии является то, что порождаемые им решения всегда являются допустимыми, так как учитывают структуру сборочных единиц независимо от ее сложности. В случае задач существенной размерности использование эвристической функции позволяет сузить область поиска, исключая из рассмотрения неэффективные направления. Наконец, при необходимости учесть какие-то дополнительные условия производственных задач, это достаточно легко сделать, не меняя принципиальную структуру алгоритма. Примерами таких условий могут быть отказ от требования доступности любых деталей для изготовления с момента $T = 0$ или добавление возможности выполнять детали не на единственном станке, а на любом из нескольких идентичных. Для их выполнения достаточно изменить функцию, помещающую операцию в очередь работ станка.

Недостатком этого итеративного метода являются существенно большая вычислительная сложность и, соответственно, время работы. Для практических задач, размерность которых может в сотни раз превосходить классические тестовые примеры, эта проблема остается актуальной.

Метод муравьиной колонии имитирует поведение ищущих источник пищи муравьев. Муравей оставляет за собой постепенно испаряющийся феромонный след. Соответственно, если муравей нашел источник пищи и принес ее в муравейник, то оставленный им след будет тем сильнее, чем меньше времени потребовалось на дорогу. Если другой муравей обнаружит такой след,

то вероятность того, что он пойдет по нему, тем выше, чем сильнее след. Таким образом, постепенно все муравьи начинают пользоваться самым коротким маршрутом к источнику пищи. Алгоритм, подражающий такому поведению, был предложен Марко Дориго [10]. Агенты («муравьи») совершают многочисленные последовательные попытки построения возможных решений. При этом они используют случайный выбор, основанный одновременно на эвристике и результатах, полученных в предыдущих попытках.

Современные исследования рассматриваемой задачи чаще всего ориентированы на улучшение результатов работы алгоритма посредством ускорения сходимости и предотвращения застревания в локальных минимумах. В исследовании [11] сравниваются несколько классических эвристик, а в работе [12] метод муравьиной колонии комбинируется с эвристикой скользящего узкого места. В статье [13] предлагается механизм повышения разнообразия начальных решений. В работе [14] используются множественные колонии и модифицируется механизм обновления феромонного следа. В исследовании [15] использование элитистской модификации алгоритма сочетается с механизмом диффузии феромона.

В ряде случаев алгоритм муравьиной колонии используется в сочетании с другими методами, например генетическими алгоритмами, как в работе [16].

Однако в случае больших задач из опыта реального производства (сотни и тысячи деталей) в силу сложности $O(N^2)$ метод муравьиной колонии становится непрактичным. В настоящей работе показано, что можно существенно (в самых крупных проанализированных задачах – в 10 и более раз) улучшить время работы алгоритма, рассматривая входящую очередь заданий не в целом, а сразу разделив ее по типам работ, при этом на крупных задачах полученный результат также улучшается.

Допущения

Кратко опишем допущения, которые мы делаем в данном исследовании:

1. Операции выполняются без прерываний (невозможно заменить задание по выполнению операции с Q деталями на два задания с Q_1 и Q_2 деталей, $Q = Q_1 + Q_2$).

Это стандартное допущение. Предполагается, что разделение деталей на партии, если оно нужно, уже проведено ранее и учтено в нормах времени на операцию. Кроме того, это связано с таким важным аспектом технологичности, как использование групповых заготовок.

Вполне очевидно, что разделение операций на партии никак не влияет на алгоритм в целом: просто вместо одной операции появляются несколько для одного и того же станка, которые алгоритм будет обрабатывать тем же способом.

2. Все станки доступны непрерывно начиная с момента $T = 0$ и могут выполнять не более одной задачи одновременно.

Это также стандартное допущение. Очевидно, что если какой-то станок недоступен в некий промежуток времени, то мы можем директивно добавить в расписание на это время задачу «Простой». Если станок может выполнять две задачи одновременно, то мы можем учитывать его как два независимых станка.

3. Каждый из станков предназначен для выполнения операций только одного типа.

Это также стандартное допущение, но содержащее повод для дальнейшего исследования. Многофункциональные обрабатывающие центры могут заменять различные станки, но, во-первых, таких аппаратов меньше, чем станков, предназначенных для выполнения одного типа операций, а во-вторых, это не влияет на алгоритм в целом. Если необходимо рассматривать многофункциональные станки, то предложенный алгоритм может выбирать либо специфический, либо многофункциональный станок (возможно, благодаря добавлению особой эвристики; можно предположить, что использование специфического станка, как правило, будет предпочтительным).

4. Каждому типу операций могут соответствовать несколько идентичных станков.

Как правило, такой вариант не рассматривается, но он соответствует реалиям работы предприятия, данные которого были использованы в качестве модельных примеров. Некоторые виды операций встречаются гораздо чаще других, и без рассмотрения множественных идентичных станков реальная производственная задача не имеет смысла: длительность расписания в целом будет зависеть почти исключительно от суммарной длительности всех операций наиболее популярного типа, а порядок выполнения операций других типов не будет иметь существенного значения.

5. Мы не учитываем время на транспортировку деталей между станками и доступность нужных для этого средств.

Очевидно, что при необходимости в технологию производства можно добавить транспортировочные операции с теми или иными требованиями (возможно, динамически меняющимися) к используемому для транспортировки оборудованию. В реалиях рассматриваемого предприятия этого не требуется (партии относительно малы, а средства транспортировки никогда не являются узким местом). В целом интеграция алгоритмов управления расписанием производства и автоматической транспортировки является темой отдельных исследований [17].

6. Не рассматриваются требования по неразрывному выполнению некоторых последовательных операций.

Мы не рассматриваем данное ограничение, чтобы не затруднять восприятие основной идеи исследования. Очевидно, что при необходимости проблема решается незначительной модификацией: если следующая операция должна выполняться неразрывно, то она сразу же будет помещаться в очередь работ рассматриваемого станка.

7. Сборочные работы не делятся по требованиям к квалификации; считается, что все они выполняются одной группой рабочих (т.е. у нас есть одна очередь для всех сборочных работ).

Очевидно, что данное ограничение также не влияет на алгоритм в целом и связано только с доступными тестовыми данными, в которых нет разделения сборочных операций по категориям. Если бы такое разделение было, то это добавило бы еще один или несколько видов операций и «станков» – групп обученных их выполнению сборщиков.

Таким образом, принятые для простоты изложения основной идеи допущения не уменьшают применимости алгоритма в целом, а исключение этих ограничений требует лишь незначительных модификаций базового алгоритма (и получения соответствующих исходных данных).

Метод муравьиной колонии

Используя данный метод, мы предпринимаем многочисленные попытки построить допустимое расписание производства. Эти попытки объединяются в поколения: в рамках каждого из них все попытки используют один набор данных о результатах предыдущих поколений («таблицу следов»), который обновляется перед переходом к следующему поколению.

На каждом шаге мы выбираем, какую из доступных операций поместить в расписание, пользуясь формулой

$$P_{ij}^k = \frac{f_{ij}^\alpha \cdot e_{ij}^\beta}{\sum_{j \in N_i^k} f_{ij}^\alpha \cdot e_{ij}^\beta},$$

где k – номер муравья; P_{ij}^k – вероятность для k -го муравья поставить операцию j в позицию i расписания; f_{ij} – привлекательность варианта поставить операцию j в позицию i расписания на основании феромонного следа; e_{ij} – привлекательность варианта поставить операцию j в позицию i расписания согласно эвристике; α и β – коэффициенты значимости феромонного и эвристического факторов; N_i^k – множество операций, доступных для выполнения муравью k .

Если $f_{ij} = 0$, то присваиваем этой величине малое значение.

Выполнив все попытки в рамках одного поколения, мы должны пересчитать таблицу интенсивностей следов. Сначала все данные в ней умножаются на $E < 1$ (значение этого так называемого «коэффициента испарения» является одним из параметров алгоритма). Затем мы просматриваем все расписания, созданные «муравьями» последнего поколения. Рассмотрим расписание A со временем изготовления S_A . Если в этом расписании операция j занимала место i , то $f_{ij} = f_{ij} + Q / S_A$ (Q – произвольная константа, не влияющая на результат работы). Используем более эффективную разновидность алгоритма, в котором дополнительно усиливается след, оставленный лучшими «муравьями».

Модифицируем алгоритм, чтобы корректно учитывать наличие сборочных операций. Во время работы «муравья» мы храним: список L всех еще не выполненных операций; список W операций, выполнение которых может быть начато в текущий момент (из них мы делаем выбор на каждом шаге); список Q выполненных операций. Операции с порядковым номером 1 для каждой детали помещаются в W в начале работы. Выполнив операцию, мы переносим ее из W в Q , а следующую операцию над той же деталью добавляем в W . Если такой следующей операции не существует (деталь готова), выполняется проверка: если эта деталь – часть узла, все детали которого готовы, то только тогда первая операция над узлом добавляется в W . После этого узел рассматривается так же, как и деталь.

Материалы и методы

Разделение очередей как метод ускорения работы

Традиционный подход к решению задачи составления расписания методом муравьиной колонии основан на аналогии с задачей коммивояжера: выполняемые операции рассматриваются как аналог посещаемых вершин графа. Таким образом, на каждом шаге алгоритма при выборе очередной операции для помещения в очередь работ рассматривается все множество операций,

доступных для выполнения. Эта аналогия является достаточно точной в случае задачи с единственным станком, однако в случае цеха со многими станками это не так. Продемонстрируем это на простом примере.

Рассмотрим начальный момент времени. Если у нас в списке доступных операций W есть по одной операции $O_1 \dots O_N$ для каждого из N станков $M_1 \dots M_N$, то существует $N!$ различных последовательностей, в которых мы можем поместить эти операции в расписание. При этом очевидно, что все полученные расписания будут идентичны: по одной операции на каждом из станков.

Таким образом, если считать, что каждая операция O_i может быть выполнена лишь на одном из станков M_j , то имеет смысл разбить множество W операций, доступных для выполнения, по типу станков, на которых они должны выполняться:

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_N\}$, где N – число различных видов станков;

$W_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iz}\}$, где любая операция O_{ik} выполняется на станке M_i .

Благодаря этому мы сможем формировать порядок выполнения операций для каждого из этих множеств W_i по отдельности, применяя метод муравьиной колонии только к операциям из этого множества. Назовем получающиеся множества W_i входящими станочными списками задач.

Не будем забывать, что выполнение операции из одного входящего станочного списка задач может приводить к появлению следующей операции над той же деталью в другом входящем станочном списке. В связи с этим если мы просто будем просматривать каждый из входящих списков до исчерпания, а затем переходить к следующему, то следующие списки будут забиваться операциями, которые на нулевой момент времени не могли быть сделаны. Когда мы перейдем к следующему списку W_{i+1} , нам будет необходимо отсекалть операции, которые не могли быть выполнены, например, в начальный момент времени, что снизит производительность алгоритма.

Чтобы избежать этого, введем в рассмотрение время.

Список операций, поставленных в расписание работ станка M_i , назовем станочной очередью Q_i . Длиной станочной очереди L_{Q_i} станка M_i назовем момент планового окончания последней операции из станочной очереди Q_i .

Каждый раз, когда нам нужно выбрать операцию для помещения в расписание, мы сначала выбираем самую короткую станочную очередь Q_k : $L_{Q_k} = \min(L_{Q_i})$ и операцию из входящего списка W_k , относящегося к тому же станку M_k .

Из этого вытекает еще одно изменение в алгоритме. У нас могут быть несколько станочных очередей равной длины (например, в начале работы, когда все станки свободны, все длины равны 0), поэтому сначала мы в любом порядке рассматриваем все кратчайшие входящие очереди, выбирая из них по одной операции, и только после этого добавляем во входящие списки все новые операции, полученные на этом шаге.

Классический метод:

Пока ДоступныеОперации не пусто

{

Сгенерировать вероятности выполнения каждой из операций;

Случайно выбрать операцию O_1 по сгенерированным вероятностям;

Убрать O_1 из ДоступныеОперации и НевыполненныеОперации;

Определить операцию O_2 , ставшую доступной для выполнения;

```

Добавить O2 в ДоступныеОперации;
}
Предлагаемый метод:
    Пока ДоступныеОперации не пусто
    {
        Определить множество КратчайшиеОчереди;
        Пока КратчайшиеОчереди не пусто
        {
            Выбрать любую из кратчайших очередей Qi;
            Сгенерировать вероятности выполнения каждой из операций со-
            ответствующего ВходящегоСписка Wi;
            Случайно выбрать операцию O1 по сгенерированным вероят-
            ностям;
            Увеличить длину очереди Qi на длительность операции O1;
            Убрать O1 из ВходящегоСписка Wi и НевыполненныхОпераций;
            Определить операцию O2, ставшую доступной для выполнения;
            Добавить O2 во ВременныйМассив;
        }
        Перенести операции из ВременныйМассив в соответствующие Входя-
        щиеСписки Wk;
        Очистить ВременныйМассив;
    }

```

Соответственно, вместо одной таблицы следов муравьев мы будем хранить отдельные таблицы на каждый тип станков. В таблице следов муравьев храним порядковый номер, под которым указанная операция должна стоять в очереди заданий соответствующего станка. При этом следует учесть, что порядковый номер, под которым операция была взята из входящего списка, может отличаться от порядкового номера в расписании станка: если в расписании загрузки станка нашлось более раннее подходящее свободное время, в которое поместили рассматриваемую операцию, то стоит сразу зафиксировать это решение. Соответственно, мы формируем таблицу следов, рассматривая операции в порядке начала выполнения в очереди станка. Так как по условию задачи у нас может быть несколько идентичных станков, соответствующих одной входящей очереди, то при наличии нескольких операций с одинаковым временем начала (например, $T = 0$) всем им присваивается одинаковый номер в таблице следов. Использование в качестве значения следа суммы всех значений, включая более ранние (данный метод описан в работе [18]), устраняет возникающую проблему неоднозначности на стадии использования следов.

В результате сложность метода снижается с $O(N^2)$ до $O(n_1^2 + n_2^2 + \dots n_k^2)$, $N = n_1 + n_2 + \dots n_k$, что в случае крупных изделий и большого числа видов станков оказывается существенным. Помимо этого ускоряется обучение за счет улучшения соотношения сигнал/шум – у нас больше нет функционально идентичных решений, оставляющих разные следы.

Результаты

Для проверки предлагаемого метода были рассмотрены пять реальных производственных задач (структуры сборочных единиц, последовательности операций и их длительности и станочный парк). В отличие от многих задач

классических тестовых наборов, в этих изделиях распределение операций по типам очень неравномерное: обычно операции 3-4 самых популярных видов составляют примерно по 10 % от общего числа и занимают примерно такой же процент времени.

Было сделано по пять попыток для каждой из задач (табл. 1).

Таблица 1

Параметры рассматриваемых задач

Задача	Детали	Узлы	Уровни узлов	Операции
1	29	5	3	57
2	92	31	4	344
3	146	39	4	514
4	341	106	4	1133
5	607	138	5	2402

Параметры алгоритма:

Число поколений: 6. «Муравьев» в поколении: 100. $\alpha = 1$, $\beta = 3$, $E = 0,9$. Коэффициент элитного муравья: 3,33. Так как предметом рассмотрения является в первую очередь время работы алгоритма, то для нас несущественно, являются ли эти параметры оптимальными для рассматриваемых задач.

Эксперименты проводились без эвристики (вариант «Нет») и с «жадной» эвристикой ($e_j = C / T_j$, где T_j – длительность операции j ; C – произвольная константа). Лучшее значение в рамках одной эвристики выделено в табл. 2 жирным шрифтом.

Таблица 2

Результаты

Задача	Эвристика: нет				Эвристика: жадная			
	Классический		Предлагаемый		Классический		Предлагаемый	
	Результат, ч	Время работы, с	Результат, ч	Время работы, с	Результат, ч	Время работы, с	Результат, ч	Время работы, с
1	29,916	84,6	28,54	49,8	29,732	123,8	32,418	62
2	64,228	3520	62,082	343,2	64,266	4271,6	60,982	816,6
3	178,296	4618,8	175,518	866,6	167,89	5102,8	170,218	617,6
4	763,85	42 736	691,486	3436,2	743,924	34 392,8	729,202	2070,6
5	1532,112	88 226,8	1511,634	4302	1607,978	67 631,8	1525,72	6126

Обсуждение

Как можно заметить, во всех случаях предлагаемый алгоритм работал быстрее и почти всегда давал несколько лучшие результаты. Исключениями

по полученному результату являются задачи 1 и 3 при использовании «жадной» эвристики. В первом случае малые размеры подмножеств в сочетании с «жадной» эвристикой приводили к эффективному застреванию в локальных минимумах, не давая найти глобальный минимум. Из-за этого в задаче 1 сочетание «жадной» эвристики и предлагаемого метода стабильно выдавало худшие решения из четырех возможных сочетаний. Определение характеристик задач (общей размерности и распределения операций по станкам), которые делают случайный выбор предпочтительным по сравнению с использованием эвристики, может быть предметом дальнейших исследований.

В задаче 3 с эвристикой полученное относительно небольшое различие, по всей видимости, является следствием случайности: все попытки, предпринимаемые посредством обоих методов, давали примерно одинаковые результаты в диапазоне 167–172, но в одной из попыток классическим методом был получен результат 161,28.

Для крупных задач число муравьев было явно недостаточным, потому полученные результаты имеют довольно случайный характер. Свидетельством этого является тот факт, что в некоторых случаях решение, в итоге ставшее лучшим, было найдено в первом-втором циклах попыток, и дальнейшее самообучение улучшало средний результат по набору попыток, но не лучший. Очевидно, фактически числа попыток было недостаточно для обучения модели. Отметим, что при этом использование эвристики позволяло улучшить результаты.

Так или иначе, поставленная цель достигнута: на крупных задачах экономия времени весьма существенна, и сэкономленный ресурс может быть использован для увеличения числа попыток.

Дальнейшее увеличение эффективности работы может быть достигнуто за счет использования многопоточности. В данном случае она не применялась, во-первых, для обеспечения корректного сравнения именно алгоритмической эффективности методов, а во-вторых – из-за ограничений используемой вычислительной среды. В текущей реализации алгоритма одинаковые кратчайшие очереди рассматриваются последовательно, но так как поиски решения для них независимы, то их можно осуществлять в параллельных потоках. Кроме того, если какая-то очередь длиннее кратчайшей очереди на величину, меньшую типичной длины операции, то, вероятно, ее тоже можно обрабатывать в параллельном потоке.

Кроме того, улучшить получаемые результаты именно для задачи с многоуровневыми сборками можно, используя специальную структурную эвристику. Пример такой эвристики был нами рассмотрен в работе [19].

Заключение

В настоящем исследовании предложена модификация метода муравьиной колонии применительно к задаче составления расписания производства многостаночного цеха единичного производства изделий, включающих многоуровневые сборки. Показано, что разделение входящей очереди операций на очереди меньшего размера в соответствии с типами станков, на которых должны выполняться указанные операции, существенно сокращает время работы алгоритма. При этом получаемые результаты на крупных задачах, как правило, не хуже, чем достигаемые классическим методом.

Список литературы

1. Fry T. D., Olife M. D., Minor E. D., Keong Leong G. The effect of product structure and sequencing rule on assembly shop performance // *International Journal of Production Research*. 1989. № 27 (4). P. 671–686.
2. Philipoom P. R., Russel R. S. L., Fry T. D. A preliminary investigation of multi-attribute based sequencing rules for assembly shops // *International Journal of Production Research*. 1991. № 29 (4). P. 739–753.
3. Doctor S. R., Cavalier T. M., Egbelu P. J. Scheduling for machining and assembly in a job-shop environment // *International Journal of Production Research*. 1993. № 31 (6). P. 1275–1297.
4. McCoy D. H. C., Egbelu P. J. Minimizing production flow time in a process and assembly job shop // *International Journal of Production Research*. 1998. № 36 (8). P. 2315–2332.
5. Park M. W., Kim Y. D. A heuristic algorithm for a production planning problem in an assembly system // *Journal of Operational Research Society*. 1999. № 50. P. 138–147.
6. Moon-Won P., Kim Y. D. A branch and bound algorithm for a production scheduling problem in an assembly system under due date constraints // *European Journal of Operational Research*. 2000. № 123 (3). P. 504–518.
7. Reeja M. K., Rajendran Ch. Dispatching rules for scheduling in assembly jobshops // *International Journal of Production Research*. 2000. № 38 (9). P. 2051–2066.
8. Cao W., Xie Z., Yang J. [et al.]. A Reverse Order Hierarchical Integrated Scheduling Algorithm Considering Dynamic Time Urgency Degree of the Process Sequences // *Electronics*. 2022. № 11. doi: 10.3390/electronics11121868
9. Omkumar M., Shahabudeen P. Ant Colony Optimisation for multi-level assembly job shop scheduling // *International Journal of Manufacturing Research*. 2009. № 1. P. 127–152.
10. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*. 1996. Part B26 (1). P. 29–41.
11. Sasikala B., Eswaramurthy V. P. Ant Colony Optimization for Job Shop Scheduling Problem Using Priority Rules // *International Journal of Engineering and Techniques*. 2017. Vol. 3, is. 6.
12. Abidia M. H., Al-Harkanb I., El-Tamimib A. M. [et al.]. Ant Colony Optimization for Job Shop Scheduling to Minimize the Total Weighted Tardiness // *Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*. 2013.
13. Huang M., Guo D., Guo F. An Improved Ant Colony Algorithm for Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem // *2022 IEEE 10th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*. 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/ICCSNT56096.2022.9972994
14. Chen F., Xie W., Ma J. Textile flexible job-shop scheduling using PACO algorithm // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (9). doi: 10.3390/app14104082
15. Rahman M. L., Sazol A. Application of an improved ant colony optimization algorithm of hybrid strategies using scheduling for patient management in hospitals // *Heliyon*. 2024. Vol. 10 (21). doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40134
16. Matrenin P. V. Improvement of Ant Colony Algorithm Performance for the Job-Shop Scheduling Problem Using Evolutionary Adaptation and Software Realization Heuristics // *Algorithms*. 2023. № 16. P. 15. doi: 10.3390/a16010015
17. Tang Q., Wang H. Data-driven automated job shop scheduling optimization considering AGV obstacle avoidance // *Sci Rep*. 2025. № 15. doi: 10.1038/s41598-024-82870-1
18. Merkle D., Middendorf M. An Ant Algorithm with a New Pheromone Evaluation Rule for Total Tardiness Problems // *Real-World Applications of Evolutionary Computing. EvoWorkshops 2000. Lecture Notes in Computer Science*. № 1803. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-45561-2_28

19. Иванов М. А. Структурная эвристика для построения расписания цеха разового производства со сборочными операциями методом муравьиной колонии // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах : материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. Саратов : Наука, 2024. 702 с

References

1. Fry T.D., Olife M.D., Minor E.D., Keong Leong G. The effect of product structure and sequencing rule on assembly shop performance. *International Journal of Production Research*. 1989;(27):671–686.
2. Philipoom P.R., Russel R.S.L., Fry T.D. A preliminary investigation of multi-attribute based sequencing rules for assembly shops. *International Journal of Production Research*. 1991;(29):739–753.
3. Doctor S.R., Cavalier T.M., Egbelu P.J. Scheduling for machining and assembly in a job-shop environment. *International Journal of Production Research*. 1993;(31):1275–1297.
4. McCoy D. H. C., Egbelu P.J. Minimizing production flow time in a process and assembly job shop. *International Journal of Production Research*. 1998;(36):2315–2332.
5. Park M.W., Kim Y.D. A heuristic algorithm for a production planning problem in an assembly system. *Journal of Operational Research Society*. 1999;(50):138–147.
6. Moon-Won P., Kim Y.D. A branch and bound algorithm for a production scheduling problem in an assembly system under due date constraints. *European Journal of Operational Research*. 2000;(123):504–518.
7. Reeja M.K., Rajendran Ch. Dispatching rules for scheduling in assembly jobshops. *International Journal of Production Research*. 2000;(38):2051–2066.
8. Cao W., Xie Z., Yang J. et al. A Reverse Order Hierarchical Integrated Scheduling Algorithm Considering Dynamic Time Urgency Degree of the Process Sequences. *Electronics*. 2022;(11). doi: 10.3390/electronics11121868
9. Omkumar M., Shahabudeen P. Ant Colony Optimisation for multi-level assembly job shop scheduling. *International Journal of Manufacturing Research*. 2009;(1):127–152.
10. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*. 1996;(B26):29–41.
11. Sasikala B., Eswaramurthy V.P. Ant Colony Optimization for Job Shop Scheduling Problem Using Priority Rules. *International Journal of Engineering and Techniques*. 2017;3(6).
12. Abidia M.H., Al-Harkanb I., El-Tamimib A.M. et al. Ant Colony Optimization for Job Shop Scheduling to Minimize the Total Weighted Tardiness. *Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*. 2013.
13. Huang M., Guo D., Guo F. An Improved Ant Colony Algorithm for Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem. *2022 IEEE 10th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*. 2022:1–3. doi: 10.1109/ICCSNT56096.2022.9972994
14. Chen F., Xie W., Ma J. Textile flexible job-shop scheduling using PACO algorithm. *Applied Sciences*. 2024;14. doi: 10.3390/app14104082
15. Rahman M.L., Sazol A. Application of an improved ant colony optimization algorithm of hybrid strategies using scheduling for patient management in hospitals. *Heliyon*. 2024;10(21). doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40134
16. Matrenin P.V. Improvement of Ant Colony Algorithm Performance for the Job-Shop Scheduling Problem Using Evolutionary Adaptation and Software Realization Heuristics. *Algorithms*. 2023;(16):15. doi: 10.3390/a16010015
17. Tang Q., Wang H. Data-driven automated job shop scheduling optimization considering AGV obstacle avoidance. *Sci Rep*. 2025;(15). doi: 10.1038/s41598-024-82870-1
18. Merkle D., Middendorf M. An Ant Algorithm with a New Pheromone Evaluation Rule for Total Tardiness Problems. *Real-World Applications of Evolutionary Computing*.

EvoWorkshops 2000. Lecture Notes in Computer Science. № 1803. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-45561-2_28

19. Ivanov M.A. Structural heuristics for scheduling a one-time production workshop with assembly operations using the ant colony method. *Problemy upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh: materialy XX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf = Management problems in socio-economic and technical systems: materials of the XX International Scientific and Practical Conference.* Saratov: Nauka, 2024:702. (In Russ)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Андреевич Иванов

ведущий программист,

НефтемашСистема

(Россия, г. Саратов, ул. Гвардейская, 2А)

E-mail: mikeaivanov@gmail.com

Mikhail A. Ivanov

Lead programmer,

NeftemashSistema

(2A Gvardeiskaya street, Saratov, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.06.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО РЕСУРСА

А. В. Иващенко¹, К. К. Машков²

¹Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

²Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹anton.ivashenko@gmail.com, ²k.k.mashkov@samsmu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальная проблема организации технического обслуживания и ремонта современной медицинской техники в условиях низкой доступности комплектующих и запасных частей и ограниченного ресурса. *Материалы и методы.* Впервые предложена модель декомпозированного ресурса и изложен опыт ее использования на практике для организации технического обслуживания и ремонта медицинской техники с учетом современных требований и условий эксплуатации. Модель декомпозированного ресурса основана на иерархическом разбиении единицы медицинского оборудования (устройства) на составляющие по критерию автономности и периодичности обслуживания и ремонта. Автономность означает реализуемость раздельного обслуживания и ремонта комплектующих с учетом требований надежности и безопасности оборудования. Определено требование необходимости и достаточности обслуживания единицы медицинского оборудования в виде требования единства покрытия событиями технического обслуживания и ремонта его комплектующих. *Результаты.* Предложено использовать указанную модель декомпозированного ресурса при решении задачи управления техническим обслуживанием и ремонтом при переходе от планирования по регламенту к планированию по ресурсу. Разработанная модель декомпозированного ресурса была реализована при планировании технического обслуживания и ремонта некоторых видов медицинской техники в клиниках Самарского государственного медицинского университета для случаев невозможности регламентного обеспечения запасными частями и комплектующими. *Выводы.* Предложенная модель декомпозированного ресурса позволяет реализовать адаптивные методы планирования и управления техническим обслуживанием и ремонтом медицинской техники в системах поддержки принятия решений по эксплуатации оборудования с ограниченным ресурсом.

Ключевые слова: медицинская техника, надежность, техническое обслуживание и ремонт, декомпозиция, предиктивное планирование, организационное управление

Для цитирования: Иващенко А. В., Машков К. К. Организация технического обслуживания и ремонта медицинской техники в условиях ограниченного ресурса // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 102–112. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-8

MAINTENANCE AND REPAIR OF MEDICAL EQUIPMENT IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES

A.V. Ivaschenko¹, K.K. Mashkov²

¹Samara State Medical University, Samara, Russia

²Penza State Technological University, Penza, Russia

¹anton.ivashenko@gmail.com, ²k.k.mashkov@samsmu.ru

Abstract. *Background.* The paper discusses the urgent problem of organizing the maintenance and repair of modern medical equipment in conditions of low availability of components and spare parts and limited resource. *Materials and methods.* For the first time, a decomposed resource model is proposed and the experience of its practical use for organizing the maintenance and repair of medical equipment is presented, taking into account modern requirements and operating conditions. The decomposed resource model is based on the hierarchical decomposition of a unit of medical equipment (device) into components according to the criterion of autonomy and frequency of maintenance and repair. Autonomy means the feasibility of separate maintenance and repair of components taking into account the requirements of reliability and safety of the equipment. The requirement of necessity and sufficiency of maintenance of a unit of medical equipment is determined in the form of the requirement of unity of coverage of events of maintenance and repair of its components. *Results.* It is proposed to use the proposed decomposed resource model in solving the problem of managing maintenance and repair during the transition from planning according to regulations to planning by resource. The developed model of the decomposed resource was implemented in planning the maintenance and repair of some types of medical equipment in the clinics of the Samara State Medical University for cases where scheduled provision of spare parts and components is impossible. *Conclusions.* The proposed model of the decomposed resource allows implementing adaptive methods for planning and managing the maintenance and repair of medical equipment in decision support systems for the operation of equipment with a limited resource.

Keywords: medical technics, reliability, maintenance and repair, decomposition, predictive planning, organizational management

For citation: Ivaschenko A.V., Mashkov K.K. Maintenance and repair of medical equipment in conditions of limited resources. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):102–112. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-8

Введение

Организация технического обслуживания и ремонта (ТОиР) современной медицинской техники играет важную роль в обеспечении высокотехнологичной медицины в лечебных и профилактических учреждениях системы здравоохранения. Вместе с тем в связи со сложившимися экономическими и политическими обстоятельствами выполнение регламентных требований по обслуживанию и ремонту сложной медицинской техники иностранного производства затруднено либо невозможно. Решение данной проблемы видится в активном применении современных систем обработки информации и управления, электронных журналов регламентных работ, систем прогнозирования и предиктивной аналитики, в том числе с использованием искусственного интеллекта для уточнения ресурса, параметров надежности и безопасности оборудования и продления сроков службы в существующих условиях. В данной работе предложена модель декомпозированного ресурса и изложен опыт ее использования на практике для организации ТОиР медицинской техники с учетом современных требований и условий эксплуатации.

Материалы и методы

Согласно ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» техническое обслуживание и ремонт сложной техники представляют собой в общем случае комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности объекта при использовании по назначению, ожидании,

хранении и транспортировании (техническое обслуживание), а также по восстановлению работоспособности, исправности ресурса объекта и/или его составных частей (ремонт) [1]. Техническое обслуживание и ремонт включают такие процессы, как предварительное обследование оборудования, диагностика, ремонт, калибровка и настройка, а также тестирование и проверка на соответствие стандартам и требованиям [2].

Организация ТОиР медицинской техники связана с необходимостью соответствовать повышенным требованиям надежности и безопасности, поскольку в ходе некоторых лечебных мероприятий и процедур отказы и сбои недопустимы. Проблемы надежности медицинской техники в современных условиях эксплуатации широко обсуждаются в научном сообществе [3–5]. Для обеспечения бесперебойной работы необходимы высокоинтеллектуальное обслуживание и настройка оборудования [6].

Поддержание требуемого уровня надежности медицинских технических систем осуществляется путем проведения комплекса организационно-технических мероприятий, который включает периодическое техническое обслуживание, профилактические и восстановительные ремонтные процедуры [7, 8]. Для преодоления трудностей проведения этих мероприятий в современных условиях необходимо пересмотреть систему обслуживания и ремонта медицинской техники, например с помощью инструментов прогнозирования на основании заявленного и реального сроков службы деталей оборудования [9, 10]. В этом контексте в настоящее время расширяется практическое применение метода ремонта используемого оборудования по фактическому состоянию [11, 12].

Пути совершенствования системы организации мероприятий ТОиР в условиях цифровой трансформации на основе предиктивной аналитики результатов технического надзора за состоянием оборудования и прогнозирования структуры затрат времени на ремонт разных видов представлены в работах [13, 14]. Для повышения точности прогнозирования используются интеллектуальные технологии систем управления с использованием технологий анализа больших данных, машинного обучения и автоматизированного сбора показателей [15, 16]. Данные подходы позволяют обеспечить поддержание эксплуатационной надежности и предотвращение аварийных отключений в рамках системы ТОиР по фактическому техническому состоянию [17] с учетом предиктивности (предсказательности) и адаптивности (приспосабливаемости). Известны системы прогнозирования при проведении ТОиР, основанные на прогнозной диагностике и предиктивной аналитике [18, 19].

Учитывая существующий технический задел и современные тенденции по организации ТОиР с учетом возможностей технологий обработки данных, прогнозирования и предиктивной аналитики в качестве теоретической основы для организации технического обслуживания и ремонта медицинской техники в условиях ограниченного ресурса был выбран метод декомпозиции в иерархической структуре данных. Декомпозиция, как процесс разбиения на части, позволяет рассматривать любую исследуемую систему как сложную, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем [20, 21]. При этом в качестве критерия разбиения может рассматриваться не только структурирование или функциональное назначение, но и автономность и ремонтпригодность в рамках ТОиР. Таким образом, была предложена модель декомпозированного ресурса, описанная ниже.

Модель декомпозированного ресурса

С целью реализации рационального управления ТОиР медицинской техники была разработана модель декомпозированного ресурса, основанная на иерархическом разбиении единицы медицинского оборудования (устройства) на составляющие по критерию автономности и периодичности обслуживания и ремонта. Автономность означает реализуемость раздельного обслуживания и ремонта комплектующих с учетом требований надежности и безопасности оборудования. Периодичность в данном случае означает наличие плана упорядоченных событий обслуживания и ремонта, оптимизированного по времени, стоимости и доступности комплектующих.

Определим иерархические отношения декомпозиции единицы медицинского оборудования $q_i = q_i(\Delta t_i)$, где $i = 1 \dots Nq$ – условный порядковый номер каждой автономной единицы, Δt_i – интервал ТОиР в виде

$$D_{i,j} = D(q_i, q_j) = \{0, 1\}. \quad (1)$$

Для всех единиц медицинского оборудования определим план событий ТОиР в виде временного ряда

$$e_{i,k} = e_{i,k}(q_i, t_{i,k}, c_{i,k}) = \{0, 1\}, \quad (2)$$

где $t_{i,k}$ – планируемое время обслуживания и ремонта; $c_{i,k}$ – минимальная стоимость обслуживания, ремонта или замены единицы оборудования.

Если $e_{i,k} = 1$, то данное событие запланировано, 0 иначе. Это означает, что совокупность всех возможных вариантов ТОиР комплектующих единицы оборудования может быть упорядочена в виде дерева декомпозиции. Кроме отношений декомпозиции, события ТОиР связаны отношениями предшествования, что позволяет представить задачу в целом в виде ориентированного графа, узлами которого являются события ТОиР, а ребрами – переходы между ними. Пример построенного графа с разузлованием единицы медицинской техники в соответствии с принципом декомпозиции приведен на рис. 1.

Отметим, что в текущих условиях ограниченного ресурса стоимость крупноузлового ТОиР может быть как меньше, так и больше совокупной замены отдельных частей:

$$\forall q_i, q_j, e_{i,k} : c_{i,k} \neq \sum_j e_{j,k} \cdot c_{j,k} \cdot \delta(D(q_i, q_j)), \quad (3)$$

$$\text{где } \delta(x) = \begin{cases} 1, & x = \text{true}, \\ 0, & x = \text{false}. \end{cases}$$

Введем понятие ветви дерева декомпозиции в виде множества, которое содержит все события от терминального $q_l, D(q_l, \text{null})$ до родительского q_i :

$$B(q_i, q_l) = \{e_{n,k}\} : (e_{n,k} = e_{i,k} \in B(q_i, q_l)) \vee (e_{n,k} = e_{l,k} \in B(q_i, q_l)) \vee \\ \vee (e_{n,k} : \forall e_{m,k'}, D(q_m, q_n) \cdot \delta(e_{m,k'} \in B(q_i, q_l))). \quad (4)$$

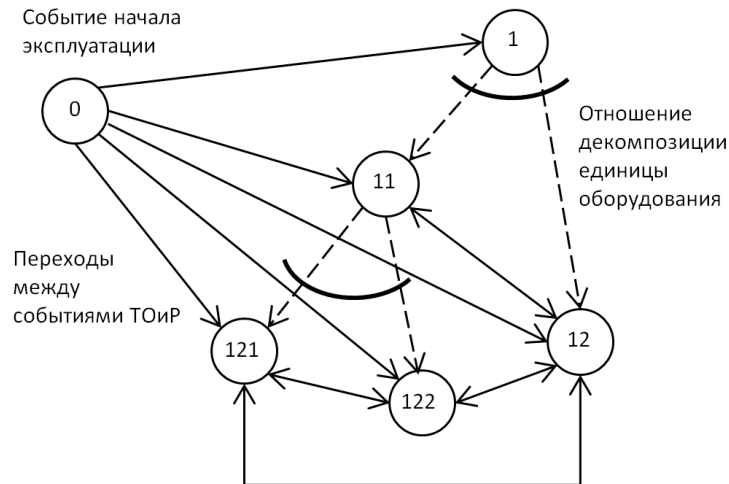


Рис. 1. Граф событий ТОиР для модели декомпозированного ресурса

Определим требование необходимости и достаточности обслуживания единицы медицинского оборудования q_i в виде требования единства покрытия событиями ТОиР его комплектующих q_j . Это означает, что для любого единичного, т.е. запланированного события, все события, находящиеся выше и ниже по иерархии ветви дерева декомпозиции, равны нулю. При этом каждая ветвь должна содержать хотя бы одно единичное значение:

$$q_i : \forall q_l, D(q_l, null) : \sum_{n,k} e_{n,k} \cdot \delta(e_{n,k} \in B(q_i, q_l)) = 1. \quad (5)$$

С учетом введенных определений задачу рационального управления ТОиР можно сформулировать как задачу оптимального планирования событий:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_q} e_{i,k} \cdot c_{i,k} &\rightarrow \min, \\ e_{i,k} \cdot t_{i,k} &< t_0 + \Delta t_i, \\ q_i : \forall q_l, D(q_l, null) : \sum_{n,k} e_{n,k} \cdot \delta(e_{n,k} \in B(q_i, q_l)) &= 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Данная задача является вариантом задачи о назначениях с ограничением по дереву декомпозиции. Особенность данной задачи состоит в вариативности выбора ресурсов, подлежащих замене при условии выполнения требований выбора компонентов декомпозиции.

Решение данной задачи может быть выполнено конструктивно путем организации прямого рекурсивного обхода дерева. Обход начинается с родительской вершины, для каждого уровня декомпозиции определяется суммарная стоимость, если при дальнейшей декомпозиции стоимость увеличивается, производится отсечение. Примеры решений приведены на рис. 2.

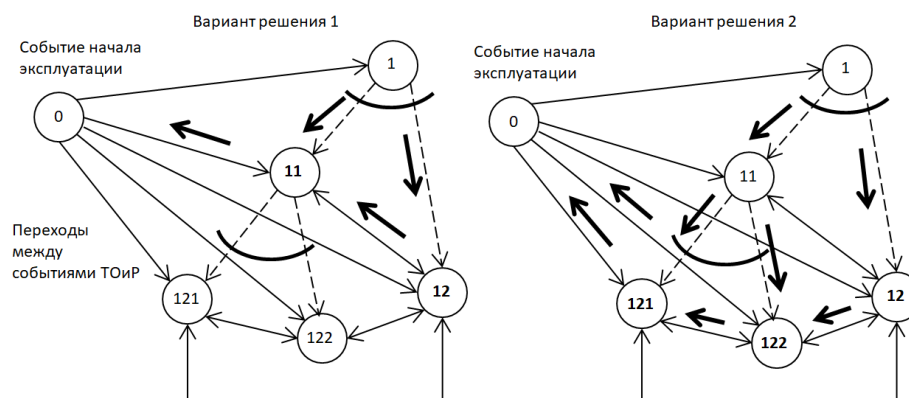


Рис. 2. Примеры обхода графа событий ТОиР в процессе решения задачи (6)

Таким образом, предлагается использовать указанную модель декомпозированного ресурса при решении задачи управления техническим обслуживанием и ремонтом при переходе от планирования по регламенту к планированию по ресурсу.

Результаты

Предложенная модель декомпозированного ресурса была реализована при планировании технического обслуживания и ремонта некоторых видов медицинской техники в клиниках Самарского государственного медицинского университета для случаев невозможности регламентного обеспечения запасными частями и комплектующими. Результаты применения этой модели на практике можно проиллюстрировать следующими примерами.

Рассмотрим наркозно-дыхательный аппарат Wato EX-35 компании Mindray. В service manual к данному аппарату написано следующее: «Эти таблицы являются достоверными, если аппарат используется 2000 часов в год. Вы должны обслуживать аппарат чаще, если вы его используете больше средней годовой наработки». Было выяснено, что все штатные неисправности аппарата связаны с заменой определенной части «комплекта обслуживания наркозного аппарата wato ex-35». Так, например, неисправность «замените кислородный датчик» говорит о том, что датчик кислорода вышел из строя и его следует заменить. Периодичность такой неисправности составляет год-полтора в зависимости от производителя датчика. Можно отметить, что появление утечки в аппарате свидетельствует о механическом повреждении любого резинового или силиконового уплотнителя аппарата, что говорит о требуемой замене. Данную замену проводят сразу вместе со всеми остальными резиновыми уплотнителями. Утечки на таких аппаратах появляются в среднем раз в два года, это говорит о том, что пора проводить техническое обслуживание аппарата.

По регламенту, описанному в service manual, обслуживание должно проводиться либо раз в год, либо каждые 2000 часов наработки. Но мы полагаем, что информация про 2000 часов была написана лишь для юридической безопасности производителя аппарата. В одном году 8760 часов. Представим, что

аппарат работает каждый день 24 часа в сутки. Таким образом, время срабатывания тревоги для каждого уплотнителя примем 8760 часов наработки.

За три года наблюдения за данными аппаратами в количестве 10 штук было выявлено, что датчик кислорода (№ 7) требует замены в среднем раз в год, замена bellow bag (№ 1) – раз в два года, замена датчиков потока (№ 10) – раз в три года, замена аккумулятора (№ 20) – раз в три года или вообще не требовалась (всегда работает от сети). Таким образом, время наработки для них было выбрано 8760, 17 520, 26 280 и 26 280 часов соответственно. Для остальных частей комплекта ТО было выбрано время 8760 часов, так как с утечкой аппарата приходится сталкиваться ежегодно, однако эти утечки можно устранить зачастую своими силами при помощи протяжки соединений. С утечками, которые уже нельзя назвать плавающими дефектами, приходится сталкиваться раз в два года.

За три года работы было выяснено, что, как правило, утечку газовой смеси дает один и тот же резиновый уплотнитель М6М-010051 (№ 15). После замены только данного резинового уплотнителя опытным путем было доказано, что аппарат может и дальше работать без утечки, не используя целый набор технического обслуживания.

Аналогично была составлена таблица событий декомпозированного ресурса для аппарата ИВЛ SV300 компании Mindray с учетом service manual этого аппарата. За три года работы аппараты не требовали технического обслуживания по замене частей из комплекта ТО для SV300. Исключениями являются аккумуляторы, из-за неисправности которых аппарат не может работать без сети, и датчики кислорода, чья замена необходима также в среднем раз в год-полтора.

Была составлена таблица событий декомпозированного ресурса для аппарата Fabius Tiro компании Drager с учетом service manual этого аппарата. Всего есть три вида сервисных наборов на Drager: MX08152, MX08832 и MX08153. Каждый набор ТО рассчитан на год, два года и три года соответственно. Можно сделать вывод о наработке этих частей в часах. В течение трех лет наблюдения за аппаратами было выявлено, что датчик кислорода требует замены каждый год-полтора. Аккумуляторы требовалось менять лишь раз за три года, датчик потока – каждые полгода. Было установлено, что некоторые виды утечек связаны с конкретными резиновыми и силиконовыми уплотнителями. Если присутствует утечка контура, как правило, требуется замена лишь диафрагм 8603780. Если присутствует утечка ИВЛ, то проблема может быть либо в 2600651, либо в 2600650. Если присутствует ошибка «сбой вентилятора» и давление рриптр меньше нормы, то проблема однозначно в резиновом уплотнителе 8404065. Из этого можно сделать вывод, что при конкретных проблемах необязательно заказывать целый набор ТО, а достаточно поменять конкретное уплотнительное кольцо.

Обсуждение

Модель декомпозированного ресурса может быть использована в качестве основы для построения базы данных эксплуатируемого медицинского оборудования организации здравоохранения, оценки и прогноза его технического состояния и автоматизированного планирования мероприятий технического обслуживания и ремонта. На базе основных определений модели может

быть сформулирована оптимизационная многокритериальная задача, решение которой возможно в автоматизированном виде методом обхода ветвей дерева декомпозиции медицинского оборудования. Решение данной задачи в автоматизированном виде обеспечивает формирование возможных решений по проведению ТОиР.

Основными преимуществами реализации предложенной модели на практике являются увеличение срока службы оборудования и сокращения простоев этого оборудования. Своевременная замена изношенных компонентов в соответствии с моделью декомпозированного ресурса способствует продлению общего срока службы медицинского оборудования. Это особенно актуально для дорогостоящих аппаратов, где преждевременная замена всего устройства является экономически нецелесообразной. Предиктивное обслуживание на основе данных об износе позволит планировать ремонтные работы заблаговременно, до возникновения критических поломок. Это минимизирует время простоя оборудования, обеспечивая непрерывность медицинского обслуживания и повышая эффективность работы учреждения.

Более того, появляется возможность значительно оптимизировать управление складскими запасами. Медицинское учреждение сможет поддерживать минимально необходимый уровень запасных частей, основываясь на реальных данных об износе, а не на предположениях. Это приведет к сокращению затрат на хранение и уменьшению риска устаревания неиспользованных компонентов.

Заключение

Предложенная модель декомпозированного ресурса позволяет реализовать адаптивные методы планирования и управления ТОиР медицинской техники в современных условиях. Данная модель предназначена для реализации в системах поддержки принятия решений по эксплуатации оборудования с ограниченным ресурсом. Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение объемов внедрения, выработку методических рекомендаций по использованию системы в практическом здравоохранении и оценку ее экономической эффективности.

Список литературы

1. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis // *Cancers*. 2023. Т. 15, № 14. Р. 3608.
2. Ганус Ю. А., Порфирьев А. С. Теоретические основы моделирования интегрированной логистической поддержки // *Экономика высокотехнологичных производств*. 2023. Т. 4, № 1. С. 51–72. doi: 10.18334/evp.4.1.119518
3. Морозов А. И., Рыков В. В. Обслуживание и ремонт медицинской техники. М. : Медицина, 2018. 328 с.
4. Болиева М. В. Проблема импортозамещения медицинского оборудования и его расходных материалов для проведения функциональных методов исследования в кардиологии // *Интернаука*. 2022. № 46-5 (269). С. 56–57.
5. Истомина Т. В. Современное состояние и перспективы применения инфокоммуникационных технологий в российской медицине // *Медицинская техника*. 2021. № 1 (325). С. 30–33.
6. Шелехов П. В., Омельяновский В. В. Анализ парка рентгенологического оборудования в Российской Федерации // *Медицинские технологии. Оценка и выбор*. 2023. № 3 (45). С. 26–32. doi: 10.17116/medtech20234503126

7. Басова Л. А., Мартынова Н. А., Кочорова Л. В. Проблемы надежности в медико-технической практике // *Здравоохранение*. 2014. № 1. С. 106–112.
8. Сидоров И. В. Техническое обслуживание медицинской техники: проблемы и перспективы // *Медицинская техника*. 2019. № 4. С. 3–8.
9. Нестерова Е. В., Игрунова С. В., Григоренко И. Н. [и др.]. Автоматизация прогнозирования неисправностей медтехники // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2024. № 3 (25). С. 13–22. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22
10. Ван Квонг Сай, Щербаков М. В. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2019. № 1 (45). С. 33–44.
11. Юрцев Е. С., Савинов Ю. И., Куликова Д. В., Жигарь А. Н. Современные методы диагностики сложных технических систем в условиях цифрового производства // *Станкоинструмент*. 2020. № 2 (19). С. 64–71.
12. Правда О. Ю., Яроцкая Н. А. Влияние высокоточной диагностики состояния оборудования на экономику промышленных предприятий // *Станкоинструмент*. 2022. № 2 (027). С. 78–81.
13. Постникова Е. С., Яроцкая Н. А., Сидоров И. М., Кошевой А. Р. Методы определения времени на техническое обслуживание и ремонт механообрабатывающего оборудования // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 9. С. 96–101. doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-96-97
14. Насонов М. А., Решетников И. С. Архитектурная трансформация системы технического обслуживания оборудования на промышленном производстве // *Автоматизация в промышленности*. 2025. № 3. С. 3–11.
15. Yang L., Chen Y., Ma X. [et al.]. A prognosis-centered intelligent maintenance optimization framework under uncertain failure threshold // *IEEE Transactions on Reliability*. 2024. Vol. 73, № 1. P. 115–130.
16. Cummins L., Sommers A., Ramezani S. B. [et al.]. Explainable predictive maintenance: a survey of current methods, challenges and opportunities // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 57574–57602.
17. Яхья А. А. Совершенствование моделей предиктивной диагностики и оценки состояния трансформаторного оборудования энергообъектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02. 2022. 193 с.
18. Поляков А. А., Чихладзе З. Д., Умнов П. И. Предиктивный анализ при проведении ТОИР // *Актуальные вопросы современной науки и образования : сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 20 мая 2021 г.) : в 2 ч. Пенза : Наука и Просвещение, 2021. Ч. 1. С. 40–43.*
19. Долгов О. С., Сафоклов Б. Б. Проектирование модели технического обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29, № 1. С. 19–26. doi: 10.34759/vst-2022-1-19-26
20. Taillard É. D. Decomposition methods. in: *design of heuristic algorithms for hard optimization* // *Graduate Texts in Operations Research*. Springer, Cham, 2023. P. 131–152. doi: 10.1007/978-3-031-13714-3_6
21. Nadkarni P. M. Metadata-driven software systems in biomedicine: designing systems that can adapt to changing knowledge. Springer Science & Business Media, 2011. P. 72.

References

1. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis. *Cancers*. 2023;15(14):3608.
2. Ganus Yu.A., Porfiriev A.S. Theoretical foundations of integrated logistics support modeling. *Ekonomika vysokotekhnologichnykh proizvodstv = Economics of high-tech industries*. 2023;4(1):51–72. (In Russ). doi: 10.18334/evp.4.1.119518

3. Morozov A.I., Rykov V.V. *Maintenance and repair of medical equipment*. Moscow: Meditsina. 2018:328. (In Russ)
4. Bolieva M.V. The problem of import substitution of medical equipment and its consumables for functional research methods. in cardiology. *Internauka = Internauka*. 2022;(46-5):56–57. (In Russ)
5. Istomina T.V. The current state and prospects of using information communication technologies in Russian medicine. *Meditsinskaya tekhnika = Medical technology*. 2021;(1):30–33. (In Russ)
6. Shelekhov P.V., Omelyanovsky V.V. Analysis of the fleet of X-ray equipment in the Russian Federation. *Meditsinskie tekhnologii. Otsenka i vybor = Medical technologies. Evaluation and selection*. 2023;(3):26–32. (In Russ). doi: 10.17116/medtech20234503126
7. Basova L.A., Martynova N.A., Kochorova L.V. Problems of reliability in medical and technical practice. *Zdravookhranenie = Healthcare*. 2014;(1):106–112. (In Russ)
8. Sidorov I.V. Maintenance of medical equipment: problems and prospects. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2019;(4):3–8. (In Russ)
9. Nesterova E.V., Igrunova S.V., Grigorenko I.N. et al. Automation of fault prediction of medical equipment. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and modeling in design and management*. 2024;(3):13–22. (In Russ). doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22
10. Wang Kwong Sai, Shcherbakov M.V. A method for predicting the residual resource based on data processing of multi-object complex systems. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: management and High Technologies*. 2019;1:33–44. (In Russ)
11. Yurtsev E.S., Savinov Yu.I., Kulikova D.V., Zhigar A.N. Modern diagnostic methods for complex technical systems in digital production conditions. *Stankoinstrument = Machine tools*. 2020;(2):64–71. (In Russ)
12. Pravda O.Yu., Yarotskaya N.A. The influence of high-precision diagnostics of equipment condition on the economy of industrial enterprises. *Stankoinstrument = Machine tools*. 2022;(2):78–81. (In Russ)
13. Postnikova E.S., Yarotskaya N.A., Sidorov I.M., Koshevoy A.R. Methods of determining time for maintenance and repair of machining equipment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2024;(9):96–101. (In Russ). doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-96-97
14. Nasonov M.A., Reshetnikov I.S. Architectural transformation of the system of technical maintenance of equipment in industrial production. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry*. 2025;(3):3–11. (In Russ)
15. Yang L., Chen Y., Ma X. et al. A prognosis-centered intelligent maintenance optimization framework under uncertain failure threshold. *IEEE Transactions on Reliability*. 2024;73(1):115–130.
16. Cummins L., Sommers A., Ramezani S.B. et al. Explainable predictive maintenance: a survey of current methods, challenges and opportunities. *IEEE Access*. 2024;12:57574–57602.
17. Yahya A.A. *Improving models of predictive diagnostics and assessment of the condition of transformer equipment of power facilities: PhD dissertation*. (In Russ)
18. Polyakov A.A., Chikhladze Z.D., Umnov P.I. Predictive analysis in the foresight of MRO. *Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki i obrazovaniya: sb. st. X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Penza, 20 maya 2021 g.) = Actual issues of modern science and education: collection of art. X International Scientific and Practical Conference (Penza, May 20, 2021)*. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2021;(1):40–43. (In Russ)
19. Dolgov O.S., Safoklov B.B. Designing an aircraft maintenance and repair model using artificial neural networks. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2022;29(1):19–26. (In Russ). doi: 10.34759/vst-2022-1-19-26

20. Taillard É.D. Decomposition methods. in: design of heuristic algorithms for hard optimization. *Graduate Texts in Operations Research*. Springer, Cham. 2023:131–152. doi: 10.1007/978-3-031-13714-3_6
21. Nadkarni P.M. *Metadata-driven software systems in biomedicine: designing systems that can adapt to changing knowledge*. Springer Science & Business Media, 2011:72.

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Владимирович Иващенко

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

Anton V. Ivaschenko

Doctor of technical sciences, professor,
head of the Higher school of medical
engineering,
Samara State Medical University
(89 Chapayevskaya street, Samara, Russia)

Кирилл Константинович Машков

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова, 1А)
E-mail: k.k.mashkov@samsmu.ru

Kirill K. Mashkov

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1A Baidukova street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 14.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 10.06.2024

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025

НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ COVID-19 ПНЕВМОНИИ

Л. Ю. Кривоногов¹, И. С. Иномбоев², Ю. П. Чебан³

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

³Пензенская областная клиническая больница имени Н. Н. Бурденко, Пенза, Россия

¹leonidkrivonogov@yandex.ru, ²ilhomdzoninomboev@gmail.com,

³petrunina_julija@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается разработка нейросетевого бинарного классификатора рентгеновских изображений грудной клетки, позволяющего обнаружить характерные признаки пневмоний, вызванных COVID-19. Приведены доводы в пользу применения рентгенографии как альтернативы компьютерной томографии при выявлении изменений в легких, характерных для COVID-19. Проведен анализ публикаций в области автоматической классификации рентгеновских изображений с признаками COVID-19 пневмоний. *Материалы и методы.* Для обучения и тестирования модели использовался авторский набор данных, состоящий из 1240 рентгеновских изображений грудной клетки. Обучающая часть набора данных была подвергнута процедуре аугментации. Предложена оригинальная четырнадцатислойная модель классификатора. Обучение модели проходило в течение 20 эпох. *Результаты.* Оценка качества классификации проведена при помощи стандартных метрик. Были получены следующие значения метрик: Sensitivity (Recall) – 95,4 %, Specificity – 97,8 %, Accuracy – 96,7 %, Precision – 96,6 %, F1-score – 96 %. Дополнительное тестирование модели было проведено на 228 изображениях базы COVID-19 Radiography Database платформы Kaggle, при этом получены следующие значения метрик: Sensitivity (Recall), Specificity, Accuracy – 96 %, Precision – 93 %, F1-score – 94 %. *Выводы.* Качество классификации рентгеновских изображений грудной клетки разработанной моделью соответствует современному уровню и достаточно близко к врачебному. Разработанный классификатор может быть использован в практической рентгенологии в качестве нейросетевого ассистента врача-рентгенолога.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, глубокое обучение, рентгенография, рентгеновское изображение грудной клетки, COVID-19

Для цитирования: Кривоногов Л. Ю., Иномбоев И. С., Чебан Ю. П. Нейросетевой классификатор рентгеновских изображений грудной клетки для обнаружения признаков COVID-19 пневмонии // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 113–126. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-9

NEURAL NETWORK CLASSIFIER OF CHEST X-RAY IMAGES FOR DETECTING SIGNS OF COVID-19 PNEUMONIA

L.Yu. Krivonogov¹, I.S. Inomboev², Yu.P. Cheban³

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

³Penza Regional Clinical Hospital named after N.N. Burdenko, Penza, Russia

¹leonidkrivonogov@yandex.ru, ²ilhomdzoninomboev@gmail.com,

³petrunina_julija@inbox.ru

Abstract. *Background.* This study presents the development of a neural network-based binary classifier for detecting COVID-related pneumonia in chest X-ray images. Arguments are given in favor of using X-ray as an alternative to computed tomography in detecting abnormalities in the lungs, associated with COVID-19. An analysis of existing publications on automatic classification of X-ray images with signs of COVID-19 pneumonia is conducted. *Materials and methods.* The author's dataset consisting of 1240 chest X-ray images was used to train and test the model. The training part of the dataset was subjected to the augmentation procedure. An original fourteen-layer classifier model was proposed and trained over 20 epochs. *Results.* The classification quality was assessed using standard metrics. The following metric values were obtained: Sensitivity (Recall) – 95,4 %, Specificity – 97,8 %, Accuracy – 96,7 %, Precision – 96,6 %, F1-scope – 96 %. Supplementary testing on 228 images from the COVID-19 Radiography Database of the Kaggle platform demonstrated consistent performance: Sensitivity (Recall), Specificity, Accuracy – 96 %, Precision – 93 %, F1-scope – 94 %. *Conclusions.* The quality of classification of chest X-ray images by the developed model corresponds to the current level and is close enough to the medical one. The developed classifier can be used in clinical radiology practice as an AI-assistant for radiologists.

Keywords: artificial neural network, deep learning, radiography, chest X-ray images, COVID-19

For citation: Krivonogov L.Yu., Inomboev I.S., Cheban Yu.P. Neural network classifier of chest X-ray images for detecting signs of COVID-19 pneumonia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):113–126. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-9

Введение

Во время пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 российская национальная система здравоохранения столкнулась с рядом серьезных проблем. Решение некоторых из них, в первую очередь связанных с дефицитом высококвалифицированных врачей-рентгенологов и недостаточной оперативностью диагностики, может быть достигнуто за счет совершенствования методов и систем автоматической интерпретации медицинских изображений.

COVID-19 вызывает высокую температуру, лихорадку, сухой кашель, затрудненное дыхание, утомляемость и может привести к тяжелым осложнениям, вплоть до летального исхода. Довольно часто на фоне среднетяжелой и тяжелой форм COVID-19 развивается пневмония, которая либо вызывается вирусом, либо является следствием иммунной реакции организма на вирус. Коронавирусная пневмония, в отличие от классической бактериальной, имеет иное течение болезни, развивается по особому механизму и затрагивает

другие структурные единицы легких. Она может протекать бессимптомно, не зависит от возраста и сезона, а течение патологического процесса в большинстве случаев приводит к двустороннему поражению легких [1, 2]. COVID-19 пневмония зачастую принимает острую, тяжелую форму, поэтому такое состояние довольно опасно и может угрожать жизни. Очевидно, что подобную пневмонию необходимо выявить как можно раньше [2].

Хотя «основой диагностики COVID-19 во время пандемии являются лабораторные методы» [3], тем не менее «для выявления пневмоний, вызванных коронавирусной инфекцией, а также их осложнений, дифференциальной диагностики с другими заболеваниями легких, определения степени выраженности и динамики изменений, оценки эффективности проводимой терапии широко применяют методы лучевой диагностики» [3].

Наибольшую чувствительность среди методов лучевой диагностики в выявлении изменений в легких, характерных для COVID-19, имеет компьютерная рентгеновская томография (КТ). Несмотря на то, что стандартная рентгенография (РГ) не имеет столь высокой чувствительности в выявлении изменений в легких, как КТ, она является широкодоступным, быстрым и недорогим методом визуализации. Рентгеновское изображение (РИ) грудной клетки (РИГК) позволяет обнаружить характерные признаки COVID-19 пневмонии, такие как двусторонние, периферические и нижнедолевые инфильтраты, а также оценить степень поражения легких и риск ряда осложнений [3]. Существует ряд доводов в пользу применения РГ в качестве альтернативы КТ при выявлении изменений в легких, характерных для COVID-19: высокая лучевая нагрузка при КТ, превышающая лучевую нагрузку при РГ в 50–350 раз; стоимость проведения КТ превышает стоимость РГ как минимум в 3–4 раза; стоимость компьютерных томографов в 5–10 раз превышает стоимость рентгеновских аппаратов, а их распространенность в России все еще недостаточна.

Несмотря на доступность получения РИГК, их интерпретация требует значительных временных затрат, большого опыта и высокой квалификации врача-рентгенолога, что значительно ограничивает массовое применение рентгенографии грудной клетки для диагностики COVID-19 во время пандемии. Создание достоверных методов автоматической интерпретации рентгеновских изображений позволит ослабить или даже снять это ограничение.

В настоящее время такая сложная и ответственная задача, как автоматическая интерпретация РИ, не может быть полноценно решена без привлечения технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Наибольшие перспективы применения при реализации систем автоматической интерпретации РИ имеют сверточные нейронные сети глубокого обучения, обладающие достаточно высокой точностью классификации различных изображений, в том числе и медицинских.

Начиная с 2020 г. в мире реализовано несколько десятков проектов в области классификации РИГК с признаками пневмоний, вызванных COVID-19 [4–19]. Пик публикационной активности по этой теме пришелся на 2020/2021 гг., но и после окончания пандемии интерес к этой проблеме снизился незначительно. Авторы исследования провели анализ научных публикаций в области автоматической классификации РИГК с признаками COVID-19 пневмоний, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Используемые методы и значения метрик качества классификации РИГК

Авторы, ссылка, год	Технологии, методы	Кол-во РИ	Значения метрик качества, %
Hemdan E. E. et al., [4], 2020	COVIDX-Net: объединение моделей VGG19, DenseNet201, InceptionV3, ResNetV2, Inception-Resnet-V2, Xception, MobileNetV2	50	Ac-90, Pr-83, Re-80, F1-89/91
Nishio M. et al., [5], 2020	Трансферное обучение VGG16, аугментация данных	1248	Ac-83,6; Se-90,9
Minaee S. et al., [6], 2020	Трансферное обучение DenseNet-121, SqueezeNet, ResNet50, ResNet18	5000	Se-98, Sp-92,9 (для SqueezeNet)
Wang L. et al., [7], 2020	Авторская модель COVID-Net	13 645	Ac-92,4
Sethy P. K. et al., [8], 2020	ResNet50+SVM	50	Ac-95,4
Bassi, Attux, [9], 2020/2021	Двойное трансферное обучение DenseNet121, DenseNet201 (на ImageNet и РИ)	112 120	Ac-100 (на 150 РИ)
Narin A. et al., [10], 2021	ResNet50, ResNet101, ResNet152, InceptionV3 и Inception-ResNetV2	100	Ac 98 для ResNet50
Ефремцев В. Г. и др., [11], 2021	Авторская CNN	1560	Pr-91, Re-95, F1-93
Shelke A. et al., [12], 2021	Объединение моделей VGG-16, DenseNet-161, ResNet-18	1000	Ac-98,9
Зеленина Л. И. и др., [13], 2021	Авторская CNN	2433	Ac-95
Nigam B. et al., [14], 2021	Трансферное обучение моделей DenseNet121, NASNet, Xception, VGG16, EfficientNet	16 634	Ac-79/93,5
Щетинин Е. Ю., [15], 2022	Трансферное обучение на ImageNet моделей Xception, MobileNetV2, InceptionResNetV2, DenseNet121, ResNet50 и VGG16	15 155	Ac-99, Re-99, Pr-99
Basma W. A., Salman H. M. A., [16], 2022	Авторская модель на основе Xception	2614	Ac-99, Pr-95, Re-92, F1-95
Chow L. S. et al., [17], 2023	Трансферное обучение 18 моделей CNN, включая VGG-19, VGG-16, ShufNet, SqueezeNet и др.	700	Ac-90,7/94,3 F1-90,8/94,3,
Harun Or Rashid et al., [18], 2023	Авторская CNN	98	Ac-97
Asif S. et al., [19], 2024	Ансамбль 14 моделей CNN. Две стратегии трансферного обучения	3886	Ac-99

В столбце «Кол-во РИ» приведено общее количество изображений, используемых для обучения, проверки и тестирования нейросетевых классификаторов. В столбце «Значения метрик качества, %» представлены значения стандартных метрик качества классификации: Accuracy (Ac), Sensitivity (Se), Specificity (Sp), Precision (Pr), Recall (Re), F1-score (F1).

Для повышения качества классификации РИГК существующие «типовые» модели сверточных нейронных сетей (CNN) зачастую подвергаются различным усовершенствованиям: разрабатываются специальные модифицированные архитектуры [7, 11, 13, 16, 18], используются многообразные варианты объединения моделей (от простого использования нескольких моделей [4, 6, 10, 12, 17] до ансамблевых методов машинного обучения [19]), комбинируются с другими технологиями машинного обучения (например, с SVM в работе [8]).

Одной из основных проблем автоматической интерпретации медицинских изображений с применением глубоких нейронных сетей является недостаточный объем входных данных для обучения моделей. Для задачи классификации РИГК не всегда возможно собрать достаточно большое количество изображений заданных классов. К тому же необходимо обеспечить достаточную сбалансированность и репрезентативность обучающих выборок, что тоже непросто. Кроме того, собранные РИ необходимо аннотировать, а это ответственный и трудоемкий процесс, исключающий полную автоматизацию.

Для решения проблемы недостаточного количества РИГК для обучения моделей многие исследователи [5, 6, 9, 14, 15, 17] применяют трансферное обучение, заключающееся в предварительном обучении модели на миллионах самых различных изображений. Дообучение модели на ограниченном наборе РИГК выполняется значительно быстрее и обычно дает лучшие результаты по сравнению с обычным обучением. При этом сокращаются трудозатраты при обучении и снижаются требования к вычислительным мощностям.

Еще одним методом решения проблемы недостаточного объема данных для обучения моделей является аугментация – увеличение размера обучающей выборки данных за счет генерации новых модифицированных версий существующих данных, что позволяет уменьшить эффект переобучения модели, повысить ее обобщаемость и, соответственно, качество классификации.

Большая часть классификаторов, приведенных в табл. 1, используют различные процедуры предварительной обработки изображений: изменение размера, нормализацию, устранение шумов и артефактов, оценку качества и др.

Что касается выбора модели для классификации РИГК, то в систематическом обзоре [20] показано, что для определения признаков COVID-19 пневмоний чаще всего выбирают модели ResNet, VGG, Xception, Inception, MobileNet, GoogleNet, DenseNet.

Качество классификации моделей во всех проектах (см. табл. 1) достаточно высокое: значения Accuracy составляют от 80 до 100 %, но сверхвысокие (близкие к 100 %) значения метрик модели обычно показывают на малых тестовых выборках. Несмотря на высокое качество классификации, существуют некоторые ограничения при практическом применении этих разработок, связанные со сложностью, требованиями к вычислительным ресурсам, недостаточной обобщающей способностью ряда моделей.

Целью исследования являются разработка и оценка качества оригинальной модели сверточной нейронной сети для бинарной классификации РИГК, обученной на небольшом наборе изображений, способной с высокой достоверностью выявлять признаки пневмоний, вызванных коронавирусной инфекцией.

Материалы и методы

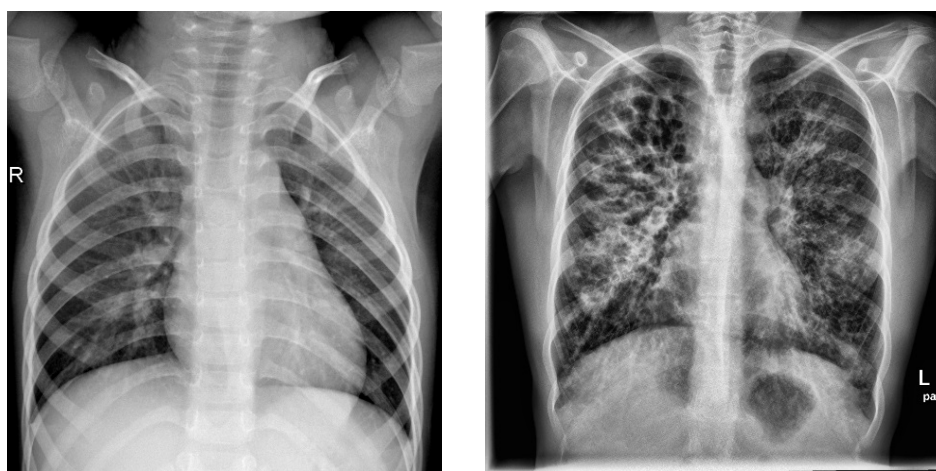
1. Описание набора данных для обучения и тестирования. Для обучения, тестирования и верификации нейросетевого классификатора был подготовлен набор данных (DataSetA), содержащий 1240 обезличенных РИГК, собранных авторами. Этот набор данных включал 555 рентгеновских изображений здоровых пациентов (класс «Normal») и 685 изображений с признаками COVID-19 (класс «Covid»), принадлежащих пациентам с подтвержденным диагнозом COVID-19. Набор данных был разделен на обучающую, тестовую и контрольную (валидационную) части. Структура DataSetA представлена в табл. 2.

Таблица 2

Структура авторского набора РИГК (DataSetA)

Части набора данных	Количество РИГК класса «Normal»	Количество РИГК класса «Covid»	Общее количество РИГК
Обучающая	333	411	744
Тестовая	111	137	248
Контрольная	111	137	248
Всего	555	685	1240

Основные параметры изображений, входящих в DataSetA: размер не менее 224×224 пикселей, 8-битная модель RGB, формат JPEG. На рис. 1 приведены примеры рентгеновских изображений грудной клетки: здорового пациента и пациента с признаками коронавирусной пневмонии и подтвержденным диагнозом COVID-19.



а)

б)

Рис. 1. Примеры РИГК:

а – здорового пациента (класс «Normal»);

б – пациента с признаками коронавирусной пневмонии (класс «Covid»)

Обучающая часть набора РИГК была подвергнута процедуре аугментации и нормализации. Аугментация значительно увеличила размер обучающей выборки и, что самое главное, повысила устойчивость модели к различным вариациям и искажениям, которые присутствуют в реальных РИГК.

2. Разработка архитектуры и оптимизация гиперпараметров модели.

На первом этапе исследования на РИГК DataSetA были обучены четыре хорошо известные модели, доказавшие свою эффективность при решении задач классификации изображений: Xception, Inceptionv3, VGG и ResNet50 (гиперпараметры моделей были установлены по умолчанию). Результаты классификации представлены в табл. 3.

Таблица 3

Метрики качества известных моделей при классификации РИГК DataSetA

Модель	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
ResNet50	0,75	0,91	0,82	0,82
VGG	0,88	0,99	0,93	0,93
Xception	0,96	0,86	0,91	0,92
Inception v3	0,92	0,99	0,94	0,95

По результатам первого этапа исследования (табл. 3) был сделан вывод о недостаточной эффективности этих моделей для классификации РИГК с признаками COVID-19 пневмонии (во всяком случае, при их обучении на DataSetA и установке гиперпараметров по умолчанию).

Для повышения эффективности классификации разработана оригинальная модель, в основу архитектуры которой положена идея удвоения количества фильтров от слоя к слою с соответствующим уменьшением размера изображения за счет операций субдискретизации (MaxPooling). Нелинейность модели обеспечивается применением функции активации ReLU. Для предотвращения переобучения применены механизмы регуляризации: после сверточных слоев введены слои Dropout с коэффициентом 0,25, а перед финальным полносвязным слоем внедрен слой Dropout с коэффициентом 0,5.

Такой подход позволил создать модель, способную извлекать высокоуровневые абстрактные, мелкие и сложные для распознавания признаки изображений, характерные для РИГК. Архитектура разработанной модели, содержащей 14 слоев, представлена в табл. 4.

Для повышения эффективности и устойчивости обучения введена ранняя остановка (прекращение обучения при отсутствии улучшения валидационных метрик качества в течение 10 эпох) и экспоненциальное снижение скорости обучения на 50 % каждые 5 эпох при отсутствии прогресса в обучении. Установлены следующие гиперпараметры, обеспечивающие стабильное и эффективное обучение: скорость обучения – 0,001, размер пакета (batch size) – 32. После каждого сверточного слоя применена пакетная нормализация (batch-normalization) для стабилизации процесса обучения и ускорения сходимости.

Таблица 4

Архитектура оригинальной модели для классификации РИГК

Номер слоя	Тип слоя	Параметры слоя	Свойства слоя
1	Входной сверточный	32 фильтра с размером ядра 3×3. Функция активации – ReLU	Выделяет базовые признаки на изображениях, такие как границы и контуры
2	Сверточный	64 фильтра с размером ядра 3×3. Функция активации – ReLU	Выявляет более сложные признаки на изображении
3	Субдискретизирующий	Операция MaxPooling, ядро размером 2×2	Снижает размерность пространства признаков и улучшает вычислительную эффективность
4	Dropout	Коэффициент 0,25	Предотвращает переобучение модели за счет случайного обнуления 25 % входных данных на каждой эпохе обучения
5	Сверточный	128 фильтров с ядром 3×3. Функция активации – ReLU	Выявляет более сложные и глубокие признаки на изображении
6	Субдискретизирующий	Операция MaxPooling, ядро 2×2	Снижает размерность пространства признаков и улучшает вычислительную эффективность модели
7	Dropout	Коэффициент 0,25	Предотвращает переобучение модели за счет случайного обнуления 25 % входных данных на каждой эпохе обучения
8	Сверточный	256 фильтров с ядром 3×3. Функция активации – ReLU	Распознает еще более сложные и глубокие признаки изображений
9	Субдискретизирующий	Операция MaxPooling, ядро 2×2	Дополнительно снижает размерность пространства признаков и повышает устойчивость модели к вариативности данных
10	Dropout	Коэффициент 0,25	Улучшает способность модели к обобщению
11	Flatten	–	Преобразует многомерное пространство признаков в одномерный вектор
12	Полносвязный (Dense)	64 нейрона, функция активации ReLU	Извлекает высокоуровневые, абстрактные признаки изображений
13	Dropout	Коэффициент 0,5	Предотвращает переобучение модели за счет случайного обнуления 50 % входных данных на каждой эпохе обучения
14	Полносвязный (Dense)	1 нейрон, функция активации Sigmoid	Обеспечивает бинарную классификацию изображений

Установленные гиперпараметры обеспечили баланс между недообучением и переобучением модели.

3. Обучение и тестирование модели. При обучении модели в качестве функции потерь использована бинарная кросс-энтропия, для оптимизации выбран алгоритм адаптивной оптимизации Adam. Качество обучения оценивалось с применением стандартных метрик классификации [21].

Обучение модели проходило в течение 20 эпох. В процессе обучения модель корректировала свои веса, увеличивая значение Accurasy и уменьшая значение функции потерь Loss. На рис. 2 показаны графики изменения Accurasy и функции потерь Loss на обучающих (Training) и валидационных (Validation) данных в зависимости от номера эпохи.

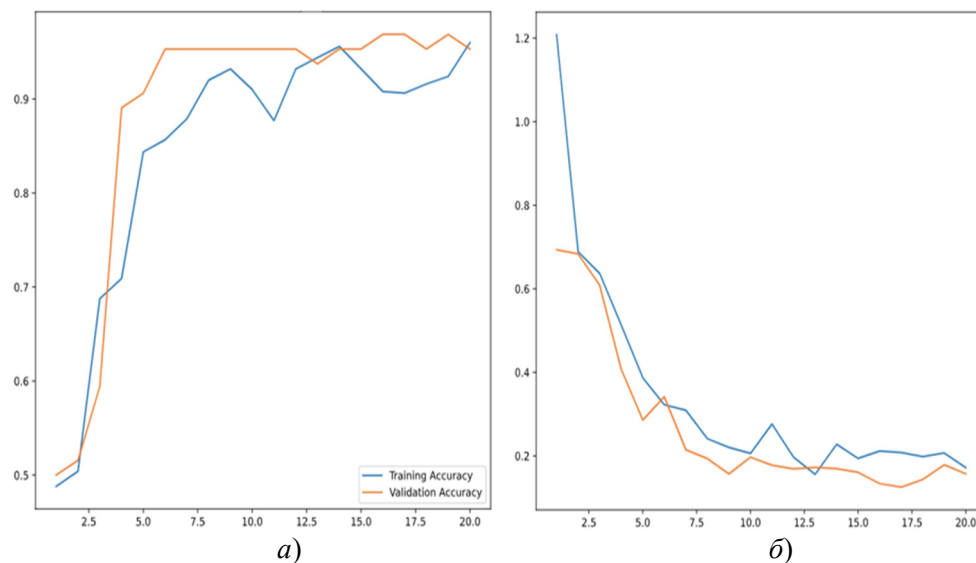


Рис. 2. Динамика изменения метрик Accurasy и Loss в процессе обучения модели:
a – Accurasy; б – Loss

Модель использовала стохастический градиентный спуск (SGD) для оптимизации весов, что позволило постепенно улучшать качество классификации на каждой эпохе. В процессе обучения было важно следить за тем, чтобы функция потерь Loss не начинала расти после достижения некоторого минимума, что свидетельствовало бы о переобучении модели.

В течение первых нескольких эпох обучения наблюдалось значительное снижение Loss и увеличение Accurasy, что характерно для начальной фазы обучения, когда модель быстро находит основные зависимости в данных. После 10-й эпохи процесс обучения начинает замедляться, значения функции потерь практически перестают уменьшаться, а модель постепенно достигает высокой сходимости, показывая достаточно стабильные значения Accurasy на валидационных данных. Такое поведение метрик Accurasy и Loss в процессе обучения свидетельствует о том, что модель смогла достаточно хорошо запомнить паттерны (признаки наличия/отсутствия COVID-19 пневмонии), содержащиеся в DataSetA, и достигла состояния, когда дальнейшее обучение практически не приводит к повышению качества классификации.

Таким образом, можно сделать вывод, что модель достигла высокого уровня сходимости и стабилизации метрик Accuracy и Loss после 10-й эпохи, что свидетельствует о ее эффективности и хорошей способности к обобщению без переобучения.

Сходимость соответствующих графиков Training и Validation друг к другу подтверждает корректность обучения модели: модель не переобучена, хорошо обобщает данные и готова к работе в реальных условиях.

Модель реализована в интегрированной среде разработки Visual Studio Code, предлагающей удобные инструменты для работы с кодом и обеспечивающей интеграцию с различными библиотеками (TensorFlow, PyTorch) и фреймворками. Для создания и управления изолированными виртуальными средами использованы средства пакета Miniconda.

Результаты и обсуждение

По результатам классификации РИГК тестовой части DataSetA были получены следующие значения метрик качества: Sensitivity (Recall) – 0,95, Specificity – 0,98, Precision – 0,97, Accuracy – 0,97, F1-score – 0,96, Loss – 0,01, которые превышают значения соответствующих метрик качества известных моделей глубокого обучения, полученные на первом этапе исследования (см. табл. 3). Близость значений метрик Precision и Recall свидетельствует о сбалансированности модели (ее способности одновременно минимизировать как ложноотрицательные, так и ложноположительные ошибки классификации).

Дополнительное тестирование обученной модели было проведено на новом наборе РИГК (DataSetB) из базы COVID-19 Radiography Database, доступной на виртуальной платформе Kaggle [22]. В DataSetB было включено 228 РИГК: 82 изображения класса «Covid» и 146 изображений класса «Normal». При классификации РИГК DataSetB были получены следующие значения метрик: Sensitivity (Recall), Specificity, Accuracy – 0,96; Precision – 0,93; Recall – 0,96; F1-score – 0,94. Значения соответствующих метрик при классификации РИГК DataSetA и DataSetB получились достаточно близкими, что доказывает репрезентативность, полноту и сбалансированность обучающих данных, а также эффективность проведенного обучения.

Сравнение результатов классификации РИГК DataSetA и DataSetB разработанной моделью с результатами других исследований в этой области (см. табл. 1) позволяет сделать вывод о достаточно высоком качестве классификации, соответствующем современному уровню.

Основываясь на значениях метрик качества врачебной классификации, приведенных в статье К. М. Арзамасова и соавторов [23], можно сделать вывод о том, что качество классификации РИГК разработанной оригинальной моделью сопоставимо с врачебным.

Заключение

Представлены основные результаты разработки оригинальной нейросетевой модели для бинарной классификации РИГК. Особенностью модели является компактная архитектура, содержащая 14 слоев. Классификатор не требует больших вычислительных мощностей при обучении. Несмотря на то, что модель была обучена на небольшом наборе изображений, она оказалась способной с высокой достоверностью выявлять признаки COVID-19 пневмоний.

Разработанный классификатор может быть использован в практической рентгенологии в качестве нейросетевого ассистента врача-рентгенолога.

Для обеспечения взаимодействия пользователя с обученной моделью было создано веб-приложение. Фронтенд разработан на JavaScript, бэкенд реализован на Python с использованием фреймворка Flask. Фронтенд и бэкенд связаны через REST API с передачей данных в формате JSON. Для защиты данных используется HTTPS и SSL-сертификат.

По результатам разработки нейросетевого классификатора РИГК получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [24].

Список литературы

1. Эсауленко Е. В., Александрович Ю. С., Бушманова А. Д. [и др.]. Вирусные пневмонии : учеб. пособие для врачей. СПб. : Изд-во СПбГПМУ, 2021.
2. Ковидная пневмония // Медпортал. URL: <https://medportal.ru/enc/infection/coronavirus/kovidnaya-pnevmoniya/> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID19): временные методические рекомендации. Версия 18 (от 26.10.2023) / Министерство здравоохранения Российской Федерации. 250 с. URL: http://disuria.ru/_id/13/1343_C19PDL261023N18.pdf (дата обращения: 20.05.2025).
4. Hemdan E. E., Shouman M. A., Karar M. E. COVIDX-NET: A Framework of Deep Learning Classifiers to Diagnose COVID-19 in X-ray Images. URL: arXiv:2003.11055 (дата обращения: 20.05.2025).
5. Nishio M., Noguchi S., Matsuo H., Murakami T. Automatic Classification between COVID-19 Pneumonia, Non-COVID-19 Pneumonia, and The Healthy on Chest X-ray Image: Combination of Data Augmentation Methods // Sci. Rep. 2020. № 10 (1). P. 1–6.
6. Minaee S., Kafieh R., Sonkac M. [et al.]. Deep-COVID: Predicting COVID-19 from chest X-ray images using deep transfer learning // Med. Image Anal. 2020. № 65. P. 101794.
7. Wang L., Lin Z. Q., Wong A. COVID-NET: A Tailored Deep Convolutional Neural Network Design for Detection of COVID-19 Cases from Chest X-Ray Images // Sci Rep. 2020. № 10 (1). P. 1–2.
8. Sethy P. K., Behera S. K., Ratha P. K., Biswas P. Detection of coronavirus disease (COVID-19) based on deep features and support vector machine. 2020. April // International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences. doi: 10.33889/IJMEMS.2020.5.4.052
9. Bassi P. R. A. S., Attux R. A Deep Convolutional Neural Network for COVID-19 Detection Using Chest X-Rays. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.01578> (дата обращения: 20.05.2025).
10. Narin A., Kaya C., Pamuk Z. Automatic Detection of Coronavirus Disease (COVID-19) Using X-ray Images and Deep Convolutional Neural Networks // Pattern Anal Appl. 2021. May 9. P. 1–4.
11. Ефремов В. Г., Ефремов Н. Г., Тетерин Е. П. [и др.]. Классификация рентгеновских изображений грудной клетки больных вирусной пневмонией и COVID-19 с помощью нейронных сетей // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 1. С. 149–153.
12. Shelke A., Inamdar M., Shah V. [et al.]. Chest X-ray Classification Using Deep Learning for Automated COVID-19 Screening // SN Comput Sci. 2021. № 2 (4). P. 300. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-021-00695-5> (дата обращения: 20.05.2025).
13. Зеленина Л. И., Хаймина Л. Э., Деменкова Е. А. [и др.]. Сверточные нейронные сети в задаче классификации медицинских изображений // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 9. С. 68–73.

14. Nigam B., Nigam A., Jain R. [et al.]. COVID-19: Automatic detection from X-ray images by utilizing deep learning methods // *Expert Syst. Appl.* 2021. № 176. P. 114883.
15. Щетинин Е. Ю. Обнаружение коронавирусной инфекции COVID-19 на основе анализа рентгеновских снимков грудной клетки методами глубокого обучения // *Компьютерная оптика*. 2022. Т. 46, № 6. С. 963–970.
16. Basma W. A., Salman H. M. A. A Convolutional Neural Network for Detecting COVID-19 from Chest X-ray Images // *Iraqi Journal of Computer Communication Control and System Engineering*. 2022. № 22 (3). P. 1–14. doi: 10.33103/uot.ijccce.22.3.1
17. Chow L. S., Tang G. S., Solihin M. I. [et al.]. Quantitative and qualitative analysis of 18 deep convolutional neural network (CNN) models with transfer learning to diagnose COVID-19 on chest X-ray (CXR) images // *SN Comput. Sci.* 2023. № 4 (2). P. 141.
18. Md. Harun Or Rashid, Minhaz M. H., Sarker A. [et al.]. COVID-19 Detection from Chest X-Ray Images Using Convolutional Neural Network Approach // *Journal of Computer and Communications*. 2023. Vol. 11, № 5.
19. Asif S., Qurrat-ul-Ain, Awais M. [et al.]. A Deep Ensemble Learning Framework for COVID-19 Detection in Chest X-ray Images // *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*. 2024. Vol. 13. P. 30.
20. Ghaderzadeh M., Farkhondeh A. Deep Learning in the Detection and Diagnosis of COVID-19 Using Radiology Modalities: A Systematic Review // *Journal of Healthcare Engineering*. 2021. P. 6677314. doi: 10.1155/2021/6677314
21. Захаренко Е. Метрики оценки качества моделей и анализ ошибок в машинном обучении. Подробное руководство. URL: https://habr.com/ru/users/egaoharu_kensei/ (дата обращения: 20.05.2025).
22. Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/> (дата обращения: 20.05.2025).
23. Арзамасов К. М., Семенов С. С., Кокина Д. Ю. [и др.]. Критерии применимости компьютерного зрения для профилактических исследований на примере рентгенографии и флюорографии органов грудной клетки // *Медицинская физика*. 2022. № 4. С. 56–63.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616745. Программа для обнаружения признаков пневмонии, вызванной COVID-19, на рентгеновских снимках грудной клетки / Л. Ю. Кривоногов, И. С. Иномбоев ; опубл. 25.03.2024.

References

1. Esaulenko E.V., Alexandrovich Yu.S., Bushmanova A.D. et. al. *Virusnye pnevmonii: ucheb. posobie dlya vrachej = Viral pneumonia: textbook. a manual for doctors*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGPMU, 2021.
2. Covid pneumonia. *Medportal = Medical portal*. (In Russ). Available at: <https://medportal.ru/enc/infection/coronavirus/kovidnaya-pnevmoniya/> (accessed 20.05.2025).
3. *Profilaktika, diagnostika i lechenie novoj koronavirusnoj infektsii (COVID19): vremennye metodicheskie rekomendatsii. Versiya 18 (ot 26.10.2023) = Prevention, diagnosis and treatment of novel coronavirus infection (COVID19): temporary guidelines. Version 18 (dated October 26, 2023)*. Ministry of Health of the Russian Federation. 250 p. (In Russ). Available at: http://disuria.ru/_id/13/1343_C19PDL261023N18.pdf (accessed 20.05.2025).
4. Hemdan E.E., Shouman M.A., Karar M.E. *COVIDX-NET: A Framework of Deep Learning Classifiers to Diagnose COVID-19 in X-ray Images*. Available at: arXiv:2003.11055 (accessed 20.05.2025).
5. Nishio M., Noguchi S., Matsuo H., Murakami T. Automatic Classification between COVID-19 Pneumonia, Non-COVID-19 Pneumonia, and The Healthy on Chest X-ray Image: Combination of Data Augmentation Methods. *Sci. Rep.* 2020;(10):1–6.
6. Minaee S., Kafieh R., Sonkac M. et al. Deep-COVID: Predicting COVID-19 from chest X-ray images using deep transfer learning. *Med. Image Anal.* 2020;(65):101794.

7. Wang L., Lin Z. Q., Wong A. COVID-NET: A Tailored Deep Convolutional Neural Network Design for Detection of COVID-19 Cases from Chest X-Ray Images. *Sci Rep.* 2020;(10):1–2.
8. Sethy P.K., Behera S.K., Ratha P.K., Biswas P. Detection of coronavirus disease (COVID-19) based on deep features and support vector machine. 2020 April. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*. doi: 10.33889/IJMEMS.2020.5.4.052
9. Bassi P.R.A.S., Attux R. A Deep Convolutional Neural Network for COVID-19 Detection Using Chest X-Rays. Available at: <https://arxiv.org/abs/2005.01578> (accessed 20.05.2025).
10. Narin A., Kaya C., Pamuk Z. Automatic Detection of Coronavirus Disease (COVID-19) Using X-ray Images and Deep Convolutional Neural Networks. *Pattern Anal Appl.* 2021;May 9:1–4.
11. Efremtsev V.G., Efremtsev N.G., Teterin E.P. et al. Classification of chest X-ray images of patients with viral pneumonia and COVID-19 using neural networks. *Komp'yuternaya optika = Computer optics*. 2021;45(1):149–153. (In Russ)
12. Shelke A., Inamdar M., Shah V. et al. Chest X-ray Classification Using Deep Learning for Automated COVID-19 Screening. *SN Comput Sci.* 2021;(2):300. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-021-00695-5> (accessed 20.05.2025).
13. Zelenina L.I., Khaimina L.E., Demenkova E.A. et al. Convolutional neural networks in the task of classifying medical images. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern science-intensive technologies*. 2021;(9):68–73. (In Russ)
14. Nigam B., Nigam A., Jain R. et al. COVID-19: Automatic detection from X-ray images by utilizing deep learning methods. *Expert Syst. Appl.* 2021;(176):114883.
15. Shchetinin E.Y. Detection of coronavirus infection COVID-19 based on the analysis of chest X-rays by deep learning methods. *Komp'yuternaya optika = Computer optics*. 2022;46(6):963–970. (In Russ)
16. Basma W.A., Salman H.M.A. A Convolutional Neural Network for Detecting COVID-19 from Chest X-ray Images. *Iraqi Journal of Computer Communication Control and System Engineering*. 2022;22:1–14. doi: 10.33103/uot.ijccce.22.3.1
17. Chow L.S., Tang G.S., Solihin M.I. et al. Quantitative and qualitative analysis of 18 deep convolutional neural network (CNN) models with transfer learning to diagnose COVID-19 on chest X-ray (CXR) images. *SN Comput. Sci.* 2023;(4):141.
18. Md. Harun Or Rashid, Minhaz M.H., Sarker A. et al. COVID-19 Detection from Chest X-Ray Images Using Convolutional Neural Network Approach. *Journal of Computer and Communications*. 2023;11(5).
19. Asif S., Qurrat-ul-Ain, Awais M. et al. A Deep Ensemble Learning Framework for COVID-19 Detection in Chest X-ray Images. *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*. 2024;13:30.
20. Ghaderzadeh M., Farkhondeh A. Deep Learning in the Detection and Diagnosis of COVID-19 Using Radiology Modalities: A Systematic Review. *Journal of Healthcare Engineering*. 2021:6677314. doi: 10.1155/2021/6677314
21. Zakharenko E. *Metriki otsenki kachestva modelej i analiz oshibok v mashinnom obuchanii. Podrobnoe rukovodstvo = Metrics for evaluating model quality and error analysis in machine learning. Detailed guide.* (In Russ.). Available at: https://habr.com/ru/users/egaoharu_kensei/ (accessed 20.05.2025).
22. *Kaggle*. Available at: <https://www.kaggle.com/> (accessed 20.05.2025).
23. Arzamasov K.M., Semenov S.S., Kokina D.Yu. et al. Criteria for the applicability of computer vision for preventive research using the example of chest X-ray and fluorography. *Meditinskaya fizika = Medical Physics*. 2022;(4):56–63. (In Russ)
24. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM № 2024616745. Programma dlya obnaruzheniya priznakov pnevmonii, vyzvannoj COVID-19, na rentgenovskikh snimkakh grudnoj kletki = Certificate of state registration of the computer program № 2024616745. A program for detecting signs of pneumonia caused by COVID-19 on chest X-rays.* L.Y. Krivonov, I.S. Inomboev; publ. 03/25/2024.

Информация об авторах / Information about the authors

Леонид Юрьевич Кривоногов

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

Leonid Yu. Krivonogov

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

Илхомджон Сулхиддинович Иномбоев

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

Ilhomjon S. Inomboev

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

Юлия Петровна Чебан

врач-рентгенолог рентгеновского
отделения,
Пензенская областная клиническая
больница имени Н. Н. Бурденко
(Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 28)
E-mail: petrunina_julija@inbox.ru

Yulia P. Cheban

Radiologist of X-ray department,
Penza Regional Clinical Hospital
named after N.N. Burdenko
(28 Lermontova street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 12.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 18.07.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025

СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ МЕТОДА НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА И МЕТОДА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ С-О

П. А. Сеченов¹, И. А. Рыбенко²

^{1,2}Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия
¹pavesa89@mail.ru, ²rybenkoi@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Задача нахождения равновесного состава сложной многокомпонентной системы выполняется путем определения минимума приведенной энергии Гиббса при ограничениях, связанных с учетом баланса массы. *Материалы и методы.* Рассмотрен выбор методов перехода от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации. Сравнивались методы неопределенных множителей Лагранжа и метод штрафных функций с различными параметрами. Выбор метода перехода от задачи безусловной оптимизации к задаче условной оптимизации повлиял на вид целевой функции приведенной энергии Гиббса. *Результаты.* При изменении целевой функции потребовалась модификация алгоритма определения первых и вторых производных в методе Ньютона – Рафсона, который используется для решения системы нелинейных алгебраических уравнений. *Выводы.* Проведен сравнительный анализ двух программных реализаций метода штрафных функций (с постоянным значением штрафа и с монотонно возрастающим значением штрафа) и метода множителей Лагранжа.

Ключевые слова: термодинамическая система, равновесный состав, поиск минимума приведенной энергии Гиббса, метод неопределенных множителей Лагранжа, метод штрафных функций

Для цитирования: Сеченов П. А., Рыбенко И. А. Сравнение программных реализаций метода неопределенных множителей Лагранжа и метода штрафных функций при решении задачи определения равновесного состава на примере системы С-О // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 127–140. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-10

COMPARISON OF SOFTWARE IMPLEMENTATIONS OF THE METHOD OF UNCERTAIN LAGRANGE MULTIPLIERS AND THE METHOD OF PENALTY FUNCTIONS IN SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING THE EQUILIBRIUM COMPOSITION USING THE EXAMPLE OF THE C-O SYSTEM

P.A. Sechenov¹, I.A. Rybenko²

^{1,2}Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia
¹pavesa89@mail.ru, ²rybenkoi@mail.ru

© Сеченов П. А., Рыбенко И. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. *Background.* The problem of finding the equilibrium composition of a complex multicomponent system is accomplished by determining the minimum of the reduced Gibbs energy under constraints associated with taking into account the mass balance. *Materials and methods.* The choice of methods for transition from a conditional optimization problem to an unconditional optimization problem is considered. The methods of undetermined Lagrange multipliers and the penalty function method with different parameters were compared. The choice of the method for transition from the unconditional optimization problem to the conditional optimization problem affected the form of the objective function of the reduced Gibbs energy. *Results.* When changing the objective function, it was necessary to modify the algorithm for determining the first and second derivatives in the Newton – Raphson method, which is used to solve a system of nonlinear algebraic equations. *Conclusions.* A comparative analysis of two software implementations of the penalty function method is carried out: with a constant penalty value and with a monotonically increasing penalty value, and the Lagrange multiplier method.

Keywords: thermodynamic system, equilibrium composition, search for the minimum of the reduced Gibbs energy, method of undetermined Lagrange multipliers, penalty function method

For citation: Sechenov P.A., Rybenko I.A. Comparison of software implementations of the method of uncertain Lagrange multipliers and the method of penalty functions in solving the problem of determining the equilibrium composition using the example of the C-O system. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(3):127–140. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-10

Введение

Проведен сравнительный анализ применения численных методов оптимизации при решении задачи определения равновесного состава термодинамической системы, которая решается путем поиска минимума приведенной энергии Гиббса. Эта задача представляет собой задачу нелинейного программирования, т.е. задачу с ограничениями на входные параметры системы. При решении рассматривали два метода нелинейного программирования: метод множителей Лагранжа и метод штрафных функций. С помощью метода множителей Лагранжа задача с ограничениями типа равенств преобразуется в эквивалентную задачу безусловной оптимизации, в которой добавляются неизвестные параметры, определяемые как множители Лагранжа [1]. Метод штрафных функций является одним из наиболее распространенных методов решения задач нелинейного программирования [2]. Вспомогательная функция в методе штрафных функций выбирается так, чтобы она совпадала с минимизированной функцией внутри области допустимых решений и быстро возрастала вне ее [3]. Метод штрафных функций, так же как и метод неопределенных множителей Лагранжа, позволяет перейти от функции с ограничениями к функции без них [4].

Целью данной работы является выбор метода для ограничений типа равенств в задаче нахождения равновесного состава на примере системы модельной термодинамической системы С-О.

Материалы и методы

Задача нахождения равновесного состава сложной многокомпонентной системы сводится к поиску минимума приведенной энергии Гиббса [5].

Необходимо найти минимум функции приведенной энергии Гиббса

$$F(T, \bar{x}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях, учитывающих баланс сохранения массы.

На рис. 1 изображена схема применения численных методов при решении задачи определения равновесного состава термодинамической системы. Данное исследование посвящено выбору метода нелинейного программирования для перехода от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации.

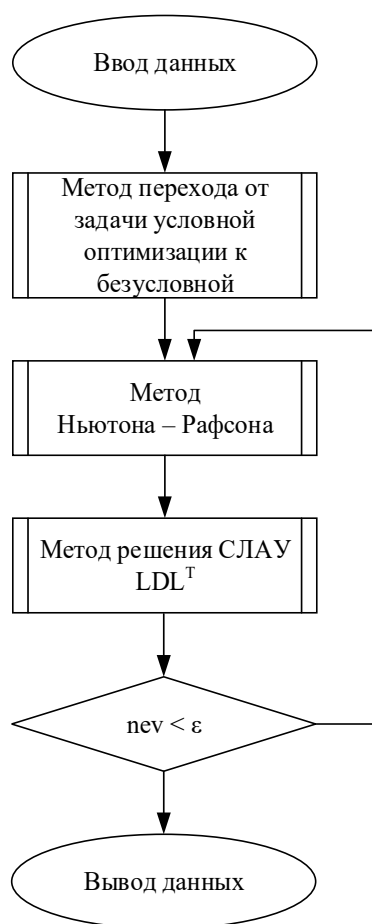


Рис. 1. Применение численных методов при нахождении равновесного состава сложной многокомпонентной системы

Среди аналитических методов решения оптимизационных задач перехода от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации особую роль играет метод множителей Лагранжа [6], который будет сравниваться с методом штрафных функций. В методе множителей Лагранжа количество неизвестных увеличивается за счет добавления неизвестных для каждого ограничения [7]. Этот выбор влияет на вид функции задачи безусловной оптимизации, а следовательно, и на определение первых и вторых производных в методе Ньютона – Рафсона, который используется для решения системы

нелинейных алгебраических уравнений. Данный метод был выбран, потому что методы первого порядка просты в реализации, но работают медленно. Методы второго порядка определяют экстремум функции за гораздо меньшее число итераций [8], но сложны и ресурсоемки, т.е. одна итерация занимает много времени и требует большого количества памяти [9]. Выбор метода LDL^T [9] для решения системы линейных алгебраических уравнений рассмотрен в статье [10]. Данный метод применяется для симметричных положительно определенных матриц, и в отличие от метода Холецкого в нем не применяется операция извлечения квадратного корня [9].

Так как применение метода неопределенных множителей Лагранжа было представлено ранее в статье [5], рассмотрим метод штрафных функций применительно к задаче нахождения равновесного состава системы С-О. Согласно данным из термодинамической базы данных ТСИВ [11], возможно получение 13 веществ: O, O₂, C(c), C, C₂, C₃, C₄, C₅, CO, CO₂, C₂O, C₃O₂, O₃.

Будем считать, что в системе С-О в равновесном состоянии возможно образование только четырех веществ: O₂, C(c), CO и CO₂. В рассматриваемой задаче количество вещества продуктов реакций представлено в табл. 1.

Таблица 1

Количество вещества в продуктах реакций для системы С-О

Количество веществ, моль	Продукты реакций			
	O ₂	C(c)	CO	CO ₂
O	2	0	1	0,5
C	1	1	1	1

Количество вещества для O₂, C(c), CO и CO₂ в функции обозначим соответственно через переменные x_0 , x_1 , x_2 и x_3 . Следует отметить, что у углерода стоит индекс (с) – конденсированная фаза, это означает, что углерод находится в твердом состоянии, остальные вещества – в газообразном состоянии.

Исходную функцию для приведенной энергии Гиббса с учетом состояния (твердое или газообразное) для четырех возможных веществ можно записать в следующем виде:

$$F(T, \bar{x}) = c_0 x_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + x_0 \ln x_0 + x_2 \ln x_2 + x_3 \ln x_3 - (x_0 + x_2 + x_3) \ln(x_0 + x_2 + x_3), \quad (2)$$

где c_i – коэффициенты приведенной энергии Гиббса для определенного вещества, зависящие от температуры.

Функцию ограничений, отражающую закон сохранения массы, можно записать в следующем виде:

$$l(\bar{x}) = \mu \cdot ((2x_0 + x_2 + 2x_3 - 1)^l + (2x_1 + x_2 + x_3 - 1)^l), \quad (3)$$

где μ – первый параметр штрафной функции; l – второй параметр штрафной функции, целое число, $l = 1, 2, \dots, n$.

Тогда исходную функцию (2) с учетом ограничений можно преобразовать следующим образом:

$$F^*(T, \bar{x}) = F(T, \bar{x}) + l(\bar{x}) = c_0 x_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + x_0 \ln x_0 + x_2 \ln x_2 + x_3 \ln x_3 - (x_0 + x_2 + x_3) \ln(x_0 + x_2 + x_3) + \mu \cdot ((2x_0 + x_2 + 2x_3 - 1)' + (x_1 + x_2 + x_3 - 1)'). \quad (4)$$

Согласно алгоритму, изображенному на рис. 1, следующим этапом является применение метода Ньютона – Рафсона. В данном методе на каждой из итераций необходимо определить вектор невязки (вектор первых производных) и Гессиан (матрицу вторых частных производных). Реализация данной схемы осуществлялась двумя способами: на основе уравнения (4); с заменой $x_i = z_i^2$ в функции (4), которая показала хорошие результаты в методе неопределенных множителей Лагранжа.

В обоих случаях примем, что второй параметр метода штрафных функции l равен 2, т.е. будет использоваться квадратичный штраф.

Вариант реализации 1. Вектор невязки будет состоять из следующих компонентов:

$$\frac{\partial F}{\partial x_0} = -\ln(x_0 + x_2 + x_3) + \ln(x_0) + 4 \cdot \mu(2x_0 + x_2 + 2x_3 - 1) + c_0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 2\mu(x_1 + x_2 + 2x_3 - 1) + c_1; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_2} = & -\ln(x_0 + x_2 + x_3) + \ln x_2 + \mu(2 \cdot (2x_0 + x_2 + 2x_3 - 1) + \\ & + 2 \cdot (x_1 + x_2 + 2x_3 - 1)) + c_2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_3} = & -\ln(x_0 + x_2 + x_3) + \ln x_3 + \mu(4 \cdot (2x_0 + x_2 + 2x_3 - 1) + \\ & + 2 \cdot (x_1 + x_2 + 2x_3 - 1)) + c_3. \end{aligned} \quad (8)$$

В общем виде можно записать выражение для твердых веществ:

$$\frac{\partial F}{\partial x_{i(\text{ТВ})}} = \sum_{p=0}^P \left(2\chi_{i,p} \mu \cdot \left(\sum_{j=0}^J \chi_{j,p} x_j - O_p \right) \right) + c_i, \quad (9)$$

где p – переменная для количества ограничений от 0 до P ; χ – коэффициент, учитывающий количество вещества в продуктах реакций (см. табл. 1); i – переменная для определения индекса строки; j – переменная для определения индекса столбца; O – количество вещества исходных продуктов.

В общем виде формулу для газообразных веществ можно представить как

$$\frac{\partial F}{\partial x_{i(\text{Г})}} = \sum_{p=0}^P \left(2\chi_{i,p} \mu \cdot \left(\sum_{j=0}^J \chi_{j,p} x_j - O_p \right) \right) + c_i - \ln \sum_{j=0}^J x_{j(\text{Г})} + \ln x_{i(\text{Г})}. \quad (10)$$

Запишем полученные составляющие для первой строки Гессиана:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0^2} = 8\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3} + \frac{1}{x_0}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial x_1} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial x_2} = 4\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial x_3} = 8\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3}. \quad (14)$$

Вторая строка Гессиана будет определяться следующими соотношениями:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_0} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1^2} = 2\mu; \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_2} = 2\mu; \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_3} = 2\mu. \quad (18)$$

Третья строка Гессиана состоит из формул

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_0} = 4\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_1} = 2\mu; \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2^2} = 4\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3} + \frac{1}{x_2}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_3} = 6\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3}. \quad (22)$$

Четвертая строка Гессиана запишется в виде равенств

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3 \partial x_0} = 8\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3}; \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3 \partial x_1} = 2\mu; \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3 \partial x_2} = 6\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3}; \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3^2} = 10\mu - \frac{1}{x_0 + x_2 + x_3} + \frac{1}{x_3}. \quad (26)$$

Наблюдается следующая закономерность для вычисления формул:

1. Если $i = j$ и $(x_i \text{ и } x_j)$ газообразные вещества:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 2\mu \sum_{p=0}^P \chi_{i,p} \chi_{j,p} - \frac{1}{\sum_{j=0}^J x_{j(r)}} + \frac{1}{x_i}. \quad (27)$$

2. Если $i \neq j$ и $(x_i \text{ или } x_j)$ твердое вещество:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 2\mu \sum_{p=0}^P \chi_{i,p} \chi_{j,p} - \frac{1}{\sum_{j=0}^J x_{j(r)}}. \quad (28)$$

3. Если $i = j$ и $(x_i \text{ и } x_j)$ твердые вещества:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 2\mu \sum_{p=0}^P \chi_{i,p} \chi_{j,p}. \quad (29)$$

4. Если $i \neq j$ и $(x_i \text{ или } x_j)$ твердое вещество:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 2\mu \sum_{p=0}^P \chi_{i,p} \chi_{j,p}. \quad (30)$$

Для проверки формул (9), (10), (27)–(30) в общем виде дополнительно были рассмотрены задачи трех переменных: Fe(c), FeO(c), Fe₂O₃(c) – и задача от пяти переменных: O, O₂, C(c), CO, CO₂. При этом найденные первые и вторые производные записывались в тестовый пример в MS Excel. После чего первые и вторые производные для разных примеров сравнивались пошагово с программной реализацией.

Вариант реализации 2. В исходном уравнении (4) была произведена замена переменных на новую переменную в квадрате:

$$\begin{aligned} F^*(T, \bar{z}) = F(T, \bar{z}) + l(\bar{z}) = & c_0 z_0^2 + c_1 z_1^2 + c_2 z_2^2 + c_3 z_3^2 + \\ & + z_0^2 \ln z_0^2 + z_2^2 \ln z_2^2 + z_3^2 \ln z_3^2 - (z_0^2 + z_2^2 + z_3^2) \ln(z_0^2 + z_2^2 + z_3^2) + \\ & + \mu \cdot ((2z_0^2 + z_2^2 + 2z_3^2 - 1)^l + (z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 - 1)^l). \end{aligned} \quad (31)$$

Вектор первых производных определяется по следующим формулам:

$$\frac{\partial F}{\partial x_0} = 2x_0 (4\mu \cdot (2x_0^3 + x_2^2 + 2x_3^2 - 1) + c_0 - \ln(x_0^2 + x_2^2 + x_3^2) + 2 \ln x_0); \quad (32)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 2x_1 (2\mu \cdot (x_1^3 + x_2^2 + x_3^2 - 1) + c_1); \quad (33)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = 2x_2 (2\mu \cdot (2x_0^2 + x_1^2 + 2x_2^3 + 3x_3^2 - 1) + c_2 - \ln(x_0^2 + x_2^2 + x_3^2) + 2 \ln x_2); \quad (34)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_3} = 2x_3 \left(2\mu \cdot (4x_0^2 + x_1^2 + 3x_2^2 + 5x_3^2 - 1) + c_3 - \ln(x_0^2 + x_2^2 + x_3^2) + 2 \ln x_3 \right). \quad (35)$$

Тогда в общем виде первая производная для твердого вещества определяется по формуле

$$\frac{\partial F}{\partial x_{i(\text{тв})}} = 2x_i \left(\sum_{p=0}^P \left(2\chi_{i,p} \mu \cdot \left(\sum_{j=0}^J \chi_{j,p} x_j^2 - O_p \right) \right) + c_i \right); \quad (36)$$

а первая производная для переменной по газообразному веществу имеет вид

$$\frac{\partial F}{\partial x_{i(\text{г})}} = 2x_i \left(\sum_{p=0}^P \left(2\chi_{i,p} \mu \cdot \left(\sum_{j=0}^J \chi_{j,p} x_j^2 - O_p \right) \right) + c_i - \ln \sum_{j=0}^J x_{j(\text{г})}^2 + 2 \ln x_{i(\text{г})} \right). \quad (37)$$

Первая строка матрицы Гессе определяется по формулам

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0^2} = 8 \cdot \mu (6x_0^2 + x_2^2 + 2x_3^2 - 1) + 2c_0 - 2 \ln \left(\ln(x_0^2 + x_2^2 + x_3^2) + \frac{2x_0^2}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) + 4(\ln x_0 + 1); \quad (38)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial x_1} = 0; \quad (39)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial x_2} = 8 \cdot 2\mu x_0 x_2 - \frac{4x_0 x_2}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2}; \quad (40)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial x_3} = 8 \cdot 4\mu x_0 x_3 - \frac{4x_0 x_3}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2}. \quad (41)$$

Вторая строка матрицы Гессе имеет вид

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_0} = 0; \quad (42)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1^2} = 4\mu \cdot (3x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - 1) + 2c_1; \quad (43)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_2} = 8\mu x_1 c_2; \quad (44)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_3} = 8\mu x_1 c_3. \quad (45)$$

Третья строка матрицы Гессе выражается с помощью формул

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_0} = 8 \cdot 2\mu x_2 x_0 - \frac{4x_2 x_0}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2}; \quad (46)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_1} = 8\mu x_1 c_2; \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial x_2^2} = & 4 \cdot \mu (2x_0^2 + x_1^2 + 6x_2^2 + 3x_3^2 - 1) + 2c_2 - \\ & - 2 \ln \left(\ln(x_0^2 + x_2^2 + x_3^2) + \frac{2x_2^2}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) + 4(\ln x_2 + 1); \end{aligned} \quad (48)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_3} = 8 \cdot 3\mu x_2 x_3 - \frac{4x_2 x_3}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2}. \quad (49)$$

Последняя, четвертая, строка определяется по формулам

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3 \partial x_0} = 8 \cdot 4\mu x_3 x_0 - \frac{4x_3 x_0}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2}; \quad (50)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3 \partial x_1} = 8\mu x_1 c_3; \quad (51)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_3 \partial x_2} = 8 \cdot 3\mu x_3 x_2 - \frac{4x_3 x_2}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2}; \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial x_3^2} = & 4 \cdot \mu (4x_0^2 + x_1^2 + 3x_2^2 + 15x_3^2 - 1) + 2c_3 - \\ & - 2 \ln \left(\ln(x_0^2 + x_2^2 + x_3^2) + \frac{2x_3^2}{x_0^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) + 4(\ln x_3 + 1). \end{aligned} \quad (53)$$

Выделим четыре основные формулы в общем виде при формировании вторых частных производных матрицы Гессе:

1. Если производная находится на диагонали и вещества газообразные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = & 4\mu \left(\sum_{p=0}^P \chi_i \left(\sum_{j=0}^J (\chi_{j,p} x_j^2) + 2x_i^2 - O_p \right) \right) + 2c_i - \\ & - 2 \left(\ln \left(\sum_{j=0}^J x_j^2 \right) + \frac{2x_i^2}{\sum_{j=0}^J x_j^2} \right) + 4 \ln(x_i + 1). \end{aligned} \quad (54)$$

2. Если оба вещества газообразные и производная не находится на главной диагонали:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 8\mu x_i x_j \sum_{p=0}^P \chi_{i,p} \chi_{j,p} - \frac{4x_i x_j}{\sum_{j=0}^J x_{j(r)}^2}. \quad (55)$$

3. Если производная находится на главной диагонали и вещество твердое:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 4\mu \left(\sum_{p=0}^P \chi_i \left(\sum_{j=0}^J (\chi_{j,p} x_j^2) + 2x_i^2 - O_p \right) \right) + 2c_i. \quad (56)$$

4. Если одно из веществ твердое и производная не находится на главной диагонали:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = 8\mu x_i x_j \sum_{p=0}^P \chi_{i,p} \chi_{j,p} . \quad (57)$$

Результаты

Вычислительные эксперименты по определению равновесного состава выполнялись в программном комплексе T-Energy. Рассматривалось два варианта реализации штрафных функций. В табл. 2 приведены результаты сравнения методов штрафных функций при четырех неизвестных при температуре 1000 К.

Рассмотрим два варианта для задания параметра штрафа: параметр постоянный, параметр возрастает.

Во втором случае для того, чтобы обеспечить сходимость последовательности точек к решению исходной задачи, в качестве штрафа выберем монотонно возрастающую последовательность целых чисел $\mu_t = \mu_{t-1} \cdot k$, $k = 2$.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента при четырех неизвестных

Параметры метода		Варианты реализации, решение правильно?		Количество итераций	
μ	k	Реализация № 1	Реализация № 2	Реализация № 1	Реализация № 2
10^4	1	Нет	Да	–	71
10^5	1	Нет	Да	–	112
10^6	1	Да	Да	29	198
10^7	1	Да	Нет	29	–
...	1	Да	Нет	29	–
10^{14}	1	Да	Нет	29	–
10^{15}	1	Да	Нет	30	–
10^{-1}	2	Да	Нет	30	–
10^0	2	Да	Нет	29	–
10	2	Да	Нет	29	–
...	2	Да	Нет	29	–
10^6	2	Да	Нет	29	–
10^7	2	Да	Нет	30	–

Как видно из табл. 2, первая реализация программы работает на более широком диапазоне: при $k = 1$ и μ от 10^6 до 10^{15} и при $k = 2$, μ от 1 до 10^7 . Вторая реализация программы работает только при постоянных значениях,

меньшее количество итераций приходится при $\mu = 10^4$. Первая реализация программы выполняется за 29 итераций, в то время как вторая реализация программы только за 71.

В табл. 3 приведены результаты нахождения минимума функции при 15 неизвестных. При большей размерности задачи потребуются больше количество итераций, а значит, параметр штрафа μ возрастет k'' раз.

Таблица 3

Решение системы из 15 переменных при температуре
от 300 до 2000 К с шагом 100

Параметры метода		Варианты реализации, решение правильно?		Количество итераций	
μ	k	Реализация № 1	Реализация № 2	Реализация № 1	Реализация № 2
10^6	1	Да	Да	35	198
...	1	Да	Нет	35	—
10^{14}	1	Да	Нет	35	—
1	2	Да	Нет	35	—
...	2	Да	Нет	35	—
10^5	2	Да	Нет	35	—

Как видно из табл. 3, первая реализация программы показала сходимость решения на большем диапазоне, в то время как вторая реализация программы выполняется только при $\mu = 10^6$ и за большее количество итераций.

Задачи большей размерности с 73 неизвестными и более с помощью метода штрафной функции не удалось решить.

С помощью метода неопределенных множителей Лагранжа задачу из табл. 2 удалось решить за 28 итераций, а задачу из табл. 3 – за 32 итерации.

Обсуждение

По представленным результатам видно, что метод неопределенных множителей Лагранжа оказался эффективнее, чем метод штрафных функций при нахождении равновесного состава бинарной термодинамической системы. При реализации метода штрафных функций возникает трудность выбора параметра штрафа μ : для получения хорошего приближения необходимо выбирать параметр штрафа достаточно большим, но тогда все производные по переменным становятся также большими [12]. При возрастании штрафа μ обусловленность матрицы Гессе $\nabla^2 F(x, \mu)$ ухудшается, когда $\mu \rightarrow \infty$.

Заключение

Рассмотрен метод штрафных функций применительно к задаче нахождения равновесного состава системы С-О. Были получены производные первого и второго порядка функции приведенной энергии Гиббса с использованием метода штрафных функций для четырех переменных. Использовались два вида реализации метода штрафных функций: исходные переменные со штрафной функцией и замена переменных в исходной функции на квадраты других переменных. Первая реализация метода штрафных функций оказалась применимой на большем диапазоне параметров метода. Задачу нахождения

равновесного состава для четырех неизвестных удалось решить методом штрафных функций за 29 и 71 итерацию для первого и второго вариантов соответственно. Эта же задача методом неопределенных множителей Лагранжа включает шесть неизвестных (добавляются два ограничения) и решается за 28 итераций.

Полная задача нахождения равновесного состава системы С-О: 13 неизвестных для метода штрафных функций и 15 неизвестных для метода неопределенных множителей Лагранжа решается быстрее последним методом за 32 итерации.

Список литературы

1. Крикунов Д. О. Методы условной оптимизации диспетчерского управления восстановлением и модернизацией летательных аппаратов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11, № 1. С. 24–28. doi: 10.17516/1999-494X-0003
2. Ганышин К. Ю., Винокурский Д. Л., Мезенцева О. С., Самойлов Ф. В. Численный метод решения оптимизационной задачи траекторного управления и поддержания формации группой автономных БПЛА с прогнозирующими моделями // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 4 (114). С. 55–60. doi: 10.35330/1991-6639-2023-4-114-55-60
3. Петров Е. Г. Методы решения задач дополнителности и двухуровневого программирования : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.01. Иркутск, 2011. 129 с.
4. Коноплев Н. Е., Компанеев Б. С. Снижение потерь электроэнергии на участке сети путем оптимизации уровня напряжения методом штрафных функций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2023. № 48. С. 50–71. doi: 10.15593/2224-9397/2023.4.0
5. Сеченов П. А., Рыбенко И. А. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49, № 4. С. 104–112. doi: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112
6. Хнаев О. А., Пчелинцев И. А. Параметрическая оптимизация систем. Методы решения экстремальных задач // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2012. № 2 (3). С. 146–152.
7. Баркалов С. А., Курочка П. Н., Маилян Л. Д. [и др.]. Оптимизационные модели – инструмент системного моделирования : монография. М. : Кредо, 2023. 522 с.
8. Нечаев Г. И., Рябичев В. Д., Скринникова А. В., Киричевский А. Р. Решение задачи оптимальной загрузки автотранспорта для различных видов груза на основе модели условной оптимизации // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 3 (36). С. 94–99.
9. Алкезуини М. М., Горбаченко В. И. Совершенствование алгоритмов обучения сетей радиальных базисных функций для решения задач аппроксимации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 3 (23). С. 123–138.
10. Сеченов П. А., Рыбенко И. А. Сравнение программных реализаций методов решения СЛАУ в задаче нахождения равновесного состава сложной многокомпонентной гетерогенной системы // Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 2024. Т. 18, № 3. С. 86–98. doi: 10.55648/1998-6920-2024-18-3-86-98
11. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : электронный справочник : в 6 т. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/index.htm> (дата обращения: 05.12.2024).

12. Буре В. М., Карелин В. В., Полякова Л. Н. Точные штрафные функции в задаче выбора оптимального оптового заказа в условиях быстрого колебания спроса // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17, № 4. С. 397–408. doi: 10.21638/11701/spbu10.2021.408

References

1. Krikunov D.O. Methods of conditional optimization of dispatching control of aircraft restoration and modernization. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Series: Machinery and Technology*. 2018;11(1):24–28. (In Russ). doi: 10.17516/1999-494X-0003
2. Ganshin K.Yu., Vinokursky D.L., Mezentseva O.S., Samoilov F.V. Numerical method for solving the optimization problem of trajectory control and formation support by a group of autonomous UAVs with predictive models. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023;(4):55–60. (In Russ). doi: 10.35330/1991-6639-2023-4-114-55-60
3. Petrov E.G. Petrov E.G. *Methods for solving problems of complementarity and two-level programming: PhD dissertation*. Irkutsk, 2011. (In Russ)
4. Konoplev N.E., Companeets B.S. Reduction of electricity losses on the grid section by optimizing the voltage level using the penalty function method. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2023;(48):50–71. (In Russ). doi: 10.15593/2224-9397/2023.4.0
5. Sechenov P.A., Rybenko I.A. Numerical method and mathematical model for finding the equilibrium composition of the thermodynamic system of the T-Energy software package. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2022;49(4):104–112. (In Russ). doi: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112
6. Khnaev O.A., Pchelintsev I.A. Parametric optimization of systems. Methods for solving extreme problems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2012;(2):146–152. (In Russ)
7. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D. et al. *Optimizatsionnye modeli – instrument sistemnogo modelirovaniya: monografiya = Optimization models – a system modeling tool: a monograph*. Moscow: Kredo, 2023:522. (In Russ)
8. Nechaev G.I., Ryabichev V.D., Skrennikova A.V., Kirichevsky A.R. Solving the problem of optimal loading of vehicles for various types of cargo based on the conditional optimization model. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona = Transport of the Asia-Pacific region*. 2023;(3):94–99. (In Russ)
9. Alkezuini M.M., Gorbachenko V.I. Improvement of algorithms for learning networks of radial basis functions for solving approximation problems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2017;(3):123–138. (In Russ)
10. Sechenov P.A., Rybenko I.A. Comparison of software implementations of SLA methods in the problem of finding the equilibrium composition of a complex multicomponent heterogeneous system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikatsij i informatiki = Bulletin of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics*. 2024;18(3):86–98. (In Russ). doi: 10.55648/1998-6920-2024-18-3-86-98
11. *Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv: elektronnyj spravochnik: v 6 t. = Thermodynamic properties of individual substances: electronic reference book:*

in 6 volumes. (In Russ). Available at: <http://twi.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTAN-Thermo/Rus/index.htm> (accessed 05.12.2024).

12. Bure V.M., Karelin V.V., Polyakova L.N. Exact penalty functions in the problem of choosing the optimal wholesale order in conditions of rapid fluctuations in demand. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya = Bulletin of St. Petersburg University. Applied mathematics. Informatics. Management processes.* 2021;17(4):397–408. (In Russ). doi: 10.21638/11701/spbu10.2021.408

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Александрович Сеченов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры прикладных
информационных технологий
и программирования,
Сибирский государственный
индустриальный университет
(Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
E-mail: pavesa89@mail.ru

Pavel A. Sechenov

Candidate of technical sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of applied information
technologies and programming,
Siberian State Industrial University
(42 Kirov street, Novokuznetsk, Russia)

Инна Анатольевна Рыбенко

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой прикладных
информационных технологий
и программирования,
Сибирский государственный
индустриальный университет
(Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Inna A. Rybenko

Doctor of technical sciences, associate
professor, head of the sub-department
of applied information technologies
and programming,
Siberian State Industrial University
(42 Kirov street, Novokuznetsk, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 16.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.02.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

А. В. Зиненко

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
Anna-z@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выделена необходимость модификации традиционных статистических методов, которые основываются на предположении о нормальности распределения котировок и не учитывают более сложные динамические характеристики финансовых активов. Предложена новая методология, включающая бинарный подход к выбору активов в портфель, где основанием для принятия решения служат отклики, полученные от многопрофильных методов прогнозирования. Цель исследования – повышение эффективности инвестиционных решений за счет разработки комплексной методологии поддержки принятия решений на основе трансформации, комбинирования и синтеза статистических и спектральных методов прогнозирования временных рядов. *Материалы и методы.* Комплексная методология включает в себя методы прогнозирования ARIMA/ARMA, ARIMA/GARCH и разложение Фурье, модифицированные автором. Для принятия решений на основе разработана общая модель и ее частные случаи – алгоритмы модифицированного случайного леса и Adaboost. *Результаты.* Валидация моделей, входящих в методологию, была осуществлена в сравнении с классической моделью Марковитца на четырех мировых индексах за разные временные промежутки. В подавляющем большинстве случаев предложенные модели показали лучший результат, чем классическая модель. *Выводы.* Комплексная методология поддержки принятия инвестиционных решений является более гибкой в сравнении с существующими за счет адаптации к характеру временных рядов и позволяет повысить эффективность инвестиций, что было показано при валидации. В дальнейшем планируется апробация методологии на российском рынке с расчетом экономического эффекта.

Ключевые слова: финансовые рынки, комплексная методология, инвестиционный портфель, временные ряды, персистентность, R/S-анализ, случайный лес, Adaboost

Для цитирования: Зиненко А. В. Комплексная методология поддержки принятия инвестиционных решений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 141–152. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-11

COMPREHENSIVE METHODOLOGY OF SUPPORTING INVESTMENT DECISIONS

A.V. Zinenko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
Anna-z@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper highlights the need to modify traditional statistical methods that are based on the assumption of normal distribution of quotes and do not take into account more complex dynamic characteristics of financial assets. The author proposes a new methodology that includes a binary approach to selecting assets in a portfolio, where the basis for making a decision is the feedback received from multidisciplinary forecasting methods. The purpose of the study is to improve the efficiency of investment decisions by developing a comprehensive methodology for supporting decision-making based on the transformation, combination and synthesis of statistical and spectral methods for forecasting time series. *Materials and methods.* The comprehensive methodology includes forecasting methods ARIMA/ARMA, ARIMA/GARCH and Fourier decomposition, modified by the author. To make decisions on this basis, a general model and its special cases was developed - modified random forest and Adaboost algorithms. *Results.* Validation of the models included in the methodology was carried out in comparison with the classical Markowitz model on four world indices for different periods. In the vast majority of cases, the proposed models showed a better result than the classical model. *Conclusions.* The integrated methodology for supporting investment decision-making is more flexible compared to existing ones due to adaptation to the nature of time series and allows for increased investment efficiency, which was shown during validation. In the future, author plans to test the methodology on the Russian market with calculation of the economic effect.

Keywords: financial markets, integrated methodology, investment portfolio, time series, persistence, R/S analysis, random forest, Adaboost

For citation: Zinenko A.V. Comprehensive methodology of supporting investment decisions. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):141–152. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-11

Введение

В настоящее время технологии позволяют собирать и обрабатывать большие данные, в том числе и по временным рядам, которые могут содержать динамическую информацию, полезную на практике. Статистические и спектральные методы анализа и прогнозирования временных рядов были разработаны еще до появления такого рода технологий. Таким образом, возникает необходимость модифицирования методов анализа и прогнозирования временных рядов, позволяющая применять их к временным рядам разного характера (персистентные и случайные, стационарные и нестационарные) с целью увеличить количество информации, получаемой из них. При этом с использованием современных технологий, таких как машинное обучение [1], появляется возможность создания гибкой модели, осуществляющей выбор метода прогнозирования в зависимости от характера временного ряда, а также выбор метода прогнозирования на основании результатов обучения модели.

Традиционно методы оценки финансовых инструментов опирались на две характеристики: доходность, рассчитываемую как математическое ожидание, и риск, рассчитываемый как дисперсия. Основной метрикой качества инвестиционного портфеля являлось соотношение этих двух характеристик. При этом было доказано, что биржевые котировки не всегда являются случайными [2]; соответственно, использование данного подхода не дает верной оценки. Автор придерживается постулата, что цены финансовых активов могут образовывать как случайные, так и неслучайные (персистентные) временные ряды. Таким образом, необходима комплексная методология с собственными

методами прогнозирования в зависимости от характера временного ряда, а также с универсальными метриками, которые могут быть применимы к разным типам временных рядов.

Цель исследования – повышение эффективности инвестиционных решений за счет разработки комплексной методологии поддержки принятия решений на основе трансформации, комбинирования и синтеза статистических и спектральных методов прогнозирования временных рядов.

Материалы и методы

Комплексная методология поддержки принятия решений на финансовом рынке включает в себя этапы, показанные на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема комплексной методологии поддержки принятия решений на финансовом рынке

Цель комплексной методологии поддержки принятия решений на финансовом рынке – улучшение эффективности инвестиций путем разработки альтернативных классическим моделям моделей формирования инвестиционного портфеля, учитывающих как случайный, так и персистентный характер временных рядов и работающих на разных финансовых рынках. Области применения методологии – финансовое управление и планирование, научные исследования.

Существующие методы и модели в области принятия инвестиционных решений автор предлагает разделить на две группы. Первая группа методов – это классические подходы, основанные на предположении о нормальности распределения временных рядов биржевых котировок. Данные методы до сих пор преобладают в научных работах [3, 4], а также на практике. Базовыми моделями выступают модель Марковитца [5], модели Шарпа [6] и модель ценообразования опционов Блека – Шоулза [7].

Вторая группа методов и моделей управления инвестиционным портфелем – это степенные законы. В данную группу входят фрактальный подход Бенуа Мандельброта [8], R/S-анализ, который был использован в предлагаемой автором методологии для определения персистентности или случайности временных рядов котировок [9], и степенные законы, объясняющие «толстые хвосты», иными словами большое количество отклонений от среднего более чем

на три сигма [10]. Степенные модели предлагают альтернативный классическим моделям подход, но не предоставляют конкретных моделей формирования инвестиционного портфеля [11, 12].

Комплексная методология поддержки принятия решений на финансовом рынке основывается на следующих принципах:

1. Бинарность. Данный принцип раскрывает основное отличие разработанной методологии от существующих подходов к формированию инвестиционного портфеля. Суть классических моделей – это расчет ожидаемой доходности и риска по известным данным о котировках и оптимизация их соотношения. Предлагаемая методология основывается на выборе инструмента на основании отклика – включать или не включать его в портфель, а функция потерь представляет собой отклонение прогнозного отклика от фактического отклика инструмента, который является информацией о том, вырос ли инструмент в цене за тестовый период.

2. Прогнозирование. Основой выбора финансового инструмента выступает прогноз, сделанный несколькими методами, модифицированными нами. Методы прогнозирования включают в себя модели ARIMA/ARMA [13, 14], разложение Фурье [13, 15], сингулярный спектральный анализ (SSA), экспоненциальное сглаживание и модели GARCH. Модели тестируются на больших объемах данных, и те из них, которые показали лучшие результаты, используются для формирования набора откликов.

3. Характер временных рядов. Финансовые временные ряды могут быть как случайными, так и зависящими от прошлых значений. Классические модели предполагают случайный характер, а степенные и фрактальные модели Мандельброта и Петерса – персистентность. Мы определяем характер временных рядов с использованием показателя Херста и исходя из этого выбираем метод прогнозирования.

4. Машинное обучение. Модели поддержки принятия решений, разработанные на основании откликов прогнозов, обучаются с использованием функции потерь, а затем тестируются на тестовой выборке с использованием метрик классификации [16].

5. Длительный горизонт. Поскольку предлагаемые модели основаны на откликах «инструмент вырастет в цене – инструмент не вырастет в цене», необходимо избегать влияния новостей и панических настроений. Инструмент должен объективно следовать тенденции, что происходит на длительных (более трех месяцев) промежутках. Таким образом, тестовый период в предлагаемых моделях должен составлять не менее трех месяцев, а обучающий период – не менее девяти (поскольку традиционно тестовая выборка составляет 20 % от общей).

Сбор исходных данных производился с использованием Yahoo Finance и Моех API и языка программирования Python. Для получения исходных данных нами была сконструирована функция `get_yfin(ticker, n_days)`, которая получала дневные котировки акций и валют с портала Yahoo Finance. Аргументами выступали тикер акции или валютной пары и количество дней – длина датасета. Функция использует библиотеки Python API, однако не требует создания собственного API – ключа, что делает ее универсальной для применения на любом устройстве.

Для очистки исходных данных была сконструирована функция `clean_index(list)`. Аргументом функции выступает список тикеров инструментов,

входящих в индекс. Функция убирает тикеры с пустыми значениями, строки с пустыми значениями, тикеры за недостаточно длительный временной промежуток, тикеры с одинаковыми значениями. Кроме того, поскольку для некоторых расчетов стандартное отклонение выступает знаменателем, функция убирает тикеры с нулевым разбросом. Такая функция необходима, поскольку методология предполагает прогнозирование значений котировок всех инструментов, входящих в индекс, в пределах одного запуска программы, и для бесперебойной работы алгоритма необходима такая глубокая очистка данных.

В качестве методов предложены ARIMA, разложение Фурье и комбинированный метод ARIMA/GARCH [17]. Кроме того, в базовой модели методологии используется метод наивного прогнозирования – расчет среднего арифметического прошлых значений тренировочного периода.

Методы прогнозирования использовались в зависимости от характера временных рядов, который определялся с использованием метода R/S-анализа. Для моделей формирования портфеля использовались модифицированные автором методы машинного обучения случайный лес и Adaboost [18].

Общая модель комплексной методологии поддержки принятия решений на финансовых рынках выглядит следующим образом.

Пусть задано множество объектов A . Каждый объект $A_j, j = \overline{1, n}$ изменяет свои значения во времени, временной ряд по каждому объекту представлен уровнями $y_i, i = \overline{1, m}$. Временные ряды разделяются на тренировочную и тестовую выборку $Tr = y_1 \dots y_{split}$, $Test = y_{split+1} \dots y_m$, где $split = [m \times 0,8]$. Для совокупности временных рядов задается семейство K функций прогноза P_k . Результатом применения данных функций является отклик $c_{jk} \in \{0,1\}$. Имеем $c_{jk} = \begin{cases} 1 & y_{split} \geq \widehat{y_{mk}} \\ 0 & y_{split} < \widehat{y_{mk}} \end{cases}$, где $\widehat{y_{mk}}$ – прогнозное значение уровня временного ряда методом k на момент m окончания тестового периода.

Таким образом, исходными данными для модели выбора активов в портфель является матрица размерностью $N \times K + 1$. Последний столбец матрицы показывает фактические отклики $u_{ik+1} = 0 | y_{split} \geq y_m, c_{jk+1} = 1 | y_{split} < y_m$, где y_m – фактическое значение уровня временного ряда на момент окончания тестового периода.

Для матрицы размерностью $N \times K$ (объекты – отклики) задается алгоритм машинного обучения T , который выбирает из множества откликов c_{jk} окончательный отклик t_j по каждому объекту. В качестве алгоритма T мы выбрали дерево решений, глубина K которого не может быть больше количества функций прогноза.

Далее создается ансамбль из алгоритмов $T_z, z = \overline{1, Z}$, где Z – количество алгоритмов в ансамбле, и функция точности F равна

$$F = \frac{\sum_{l=1}^2 n_l}{\sum_{l=1}^2 N_l}, \quad (1)$$

где n_l – количество l -х фактических откликов, совпадающих с l -ми откликами в модели; N_l – количество l -х откликов модели. Алгоритмы T_z повторяются до тех пор, пока функция точности F не перестанет увеличиваться.

Инструментами реализации комплексной методологии являются язык программирования Python, API для импорта данных с бирж и торговых площадок, Excel для создания базы данных.

Валидация осуществлена в следующих разделах работы.

Результаты

В рамках общей модели автором были разработаны две модели бинарного формирования портфеля. Первая базовая модель – модифицированный алгоритм случайного леса. В качестве функций прогноза выступили функции P_1 – «наивный прогноз» на основании среднего арифметического и P_2 – модифицированная автором модель ARIMA (1, 1, 1). Затем алгоритм машинного обучения T – модифицированный случайный лес [19] – генерировал подборки из исходных временных рядов котировок акций, а прогнозы «голосовали», включать или не включать акцию в портфель. Если прогноз показывал рост акции, то отклик был «включать», если падение – отклик «не включать». Окончательно выбирались в портфель те акции, количество голосов за которые превышало медианное.

Следующая расширенная модель была основана на алгоритме машинного обучения Adaboost [20]. В качестве функций прогноза выступили функции P_1 – модель ARIMA/GARCH для персистентных временных рядов и интегрированный аналог модели ARMA для случайных временных рядов и P_2 – разработанный автором алгоритм прогнозирования на основе разложения Фурье. Алгоритм Adaboost на каждой итерации задавал веса функциям прогноза – больший вес той функции, которая показала меньшую ошибку, и на основании взвешенных прогнозов выдавал финальный отклик, включать или не включать акцию в портфель по каждой акции индекса. Итерации повторялись до тех пор, пока функция точности F не переставала увеличиваться. Персистентность случайных временных рядов для выбора между моделями ARIMA/GARCH и ARMA определялась с помощью R/S-анализа.

Модели были протестированы на индексах AMEX, NASDAQ, NYSE и Forex за двухлетние промежутки с 2013 по 2024 г. На самом первом промежутке 2011–2012 гг. модель обучается. Отбор инструментов для портфеля производился тремя методами: модифицированный случайный лес, Adaboost и классическая модель Марковитца, которая была взята для сравнения. При этом модель Марковитца также давала бинарные отклики, включать или не включать инструмент в портфель. Для оценки точности алгоритмов были рассчитаны следующие метрики:

- Precision. Показывает долю правильно предсказанных положительных ответов в общем количестве предсказанных положительных ответов;
- Recall. Показывает долю положительных ответов, предсказанных алгоритмом, в общем количестве фактических положительных ответов;
- Accuracy. Показывает долю точных прогнозов по обоим классам.

Все данные метрики принимают значения от нуля до единицы либо от нуля до ста, если измерять их в процентах. Для отбора акций в портфель наиболее важна метрика Precision. Алгоритм классификации считается приемлемым,

если метрика Accuracy составляет более 50 %, иначе алгоритм классифицирует не лучше случайного выбора. Полученные метрики показаны в табл. 1–4.

Таблица 1

Сравнительные метрики качества моделей модифицированный случайный лес, Adaboost и модель Марковица для индекса Amex

Метрика	Период	Модифицированный случайный лес	Adaboost	Модель Марковица
Precision	2011–2012	0,77	0,56	0,51
	2013–2014	0,53	0,51	0,36
	2015–2016	0,46	0,6	0,46
	2017–2018	0,6	0,63	0,3
	2019–2020	0,74	0,69	0,21
	2021–2022	0,68	0,66	0,46
	2023–2024	0,66	0,73	0,61
Recall	2011–2012	0,82	0,86	0,57
	2013–2014	1	0,55	0,62
	2015–2016	0,75	0,7	0,68
	2017–2018	1	0,78	0,57
	2019–2020	0,59	0,96	0,53
	2021–2022	0,63	0,66	0,59
	2023–2024	0,7	0,69	0,65
Accuracy	2011–2012	0,65	0,6	0,53
	2013–2014	0,53	0,5	0,5
	2015–2016	0,52	0,67	0,52
	2017–2018	0,6	0,83	0,41
	2019–2020	0,57	0,69	0,41
	2021–2022	0,55	0,77	0,49
	2023–2024	0,57	0,69	0,52

Таблица 2

Сравнительные метрики качества моделей модифицированный случайный лес, Adaboost и модель Марковица для индекса Nasdaq

Метрика	Период	Модифицированный случайный лес	Adaboost	Модель Марковица
1	2	3	4	5
Precision	2011–2012	0,47	0,68	0,67
	2013–2014	0,96	0,67	0,8
	2015–2016	0,55	0,67	0,66
	2017–2018	0,85	0,19	0,45
	2019–2020	0,68	0,85	0,8
	2021–2022	0,87	0,41	0,35
	2023–2024	0,71	0,71	0,7
Recall	2011–2012	0,63	0,77	0,47
	2013–2014	0,72	0,99	0,57
	2015–2016	0,88	0,83	0,55
	2017–2018	0,79	0,45	0,7
	2017–2018	0,79	0,45	0,7
	2019–2020	0,62	0,55	0,54

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
	2021–2022	0,84	0,52	0,49
	2023–2024	0,64	0,72	0,51
Accuracy	2011–2012	0,57	0,6	0,46
	2013–2014	0,7	0,67	0,54
	2015–2016	0,55	0,63	0,54
	2017–2018	0,71	0,7	0,49
	2019–2020	0,59	0,56	0,54
	2021–2022	0,76	0,55	0,49
	2023–2024	0,56	0,6	0,51

Таблица 3

Сравнительные метрики качества моделей модифицированный случайный лес, Adaboost и модель Марковица для индекса Nyse

Метрика	Период	Модифицированный случайный лес	Adaboost	Модель Марковица
Precision	2011–2012	0,73	0,79	0,83
	2013–2014	0,88	0,6	0,69
	2015–2016	0,49	0,79	0,56
	2017–2018	0,83	0,73	0,44
	2019–2020	0,65	0,69	0,8
	2021–2022	0,9	0,66	0,43
	2023–2024	0,69	0,75	0,77
Recall	2011–2012	0,6	0,99	0,52
	2013–2014	0,7	0,89	0,49
	2015–2016	0,61	0,64	0,53
	2017–2018	0,64	0,89	0,6
	2019–2020	0,64	0,56	0,51
	2021–2022	0,86	0,98	0,51
	2023–2024	0,66	0,99	0,53
Accuracy	2011–2012	0,56	0,79	0,54
	2013–2014	0,66	0,61	0,51
	2015–2016	0,48	0,59	0,51
	2017–2018	0,59	0,71	0,53
	2019–2020	0,58	0,55	0,52
	2021–2022	0,79	0,66	0,5
	2023–2024	0,57	0,75	0,53

Таблица 4

Сравнительные метрики качества моделей модифицированный случайный лес, Adaboost и модель Марковица для индекса Forex

Метрика	Период	Модифицированный случайный лес	Adaboost	Модель Марковица
1	2	3	4	5
Precision	2011–2012	0,56	0,64	0,48
	2013–2014	0,57	0,7	0,47
	2015–2016	0,54	0,51	0,5

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5
Precision	2017–2018	0,58	0,69	0,48
	2019–2020	0,6	0,74	0,55
	2021–2022	0,53	0,69	0,47
	2023–2024	0,6	0,68	0,58
Recall	2011–2012	0,7	0,4	0,54
	2013–2014	0,66	0,68	0,54
	2015–2016	0,63	0,58	0,54
	2017–2018	0,68	0,56	0,58
	2019–2020	0,6	0,68	0,48
	2021–2022	0,79	0,41	0,55
	2023–2024	0,62	0,8	0,56
Accuracy	2011–2012	0,56	0,62	0,52
	2013–2014	0,55	0,64	0,54
	2015–2016	0,59	0,52	0,51
	2017–2018	0,59	0,59	0,51
	2019–2020	0,57	0,68	0,48
	2021–2022	0,58	0,64	0,5
	2023–2024	0,55	0,66	0,51

Результаты и обсуждение

Валидация комплексной методологии поддержки принятия решений на финансовом рынке производилась на четырех индексах крупнейших мировых бирж. Разные рыночные условия были достигнуты за счет того, что было проанализировано семь временных промежутков. Метриками качества моделей выступили Precision, Recall и Accuracy. Для сравнения аналогичная валидация осуществлялась по классической модели Марковица.

По наиболее важной метрике Precision предложенные модели показывают лучшие результаты, чем классическая модель, за исключением индекса NYSE за период 2017–2018 гг. и индекса NASDAQ за 2013–2014 и 2017–2018 гг. За эти периоды модель Марковица показала лучший результат, чем Adaboost. По метрике Recall алгоритм Adaboost в большинстве случаев показал лучшие результаты. Модель Марковица показала более высокий результат только в двух случаях: по рынку Forex за период 2021–2022 гг. и по индексу NASDAQ за 2017–2018 гг. Метрика Accuracy в большинстве случаев превышает 50 % по всем моделям; это говорит о том, что как разработанные, так и классическая модели являются рабочими. Однако во всех случаях по данной метрике наиболее слабые результаты показала модель Марковица.

Заключение

В работе представлена комплексная методология принятия решений на финансовом рынке, основанная на прогнозировании, бинарном подходе и на утверждении как о персистентном, так и случайном характере финансовых временных рядов. Рассмотрены все составляющие методологии, представлена общая модель. В рамках общей модели разработаны две частные: модифицированный случайный лес и Adaboost. Произведена валидация разработанных

моделей в сравнении с классической моделью Марковица на четырех индексах за семь временных промежутков. В подавляющем большинстве случаев разработанные модели показали лучшие результаты, чем классическая модель. В дальнейшем планируется произвести апробацию моделей на российском рынке акций с расчетом экономического эффекта, выраженного доходностью портфеля.

Список литературы

1. Анастасиади Д. Е., Верещагин А. А., Пятаков М. А. Машинное обучение и его применение в различных областях, включая медицину, финансы и производство // Научный аспект. 2024. Т. 46, № 4. С. 6166–6174.
2. Гарафутдинов Р. Ф. Моделирование и прогнозирование на финансовых рынках с применением фрактального анализа : монография. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. 95 с.
3. Абузов А. Ю. Модель оптимизации портфеля инвестиций в современных условиях // Финансы и кредит. 2024. Т. 30, № 6 (846). С. 1274–1289. doi: 10.24891/fc.30.6.1274
4. Королев С. А., Язев М. В., Ермоленко А. А., Дорж А. В. Сравнительный анализ точности прогнозирования доходности акций при использовании различных модификаций модели CAPM // Финансовая экономика. 2020. № 3. С. 375–380.
5. Свириной Т. Анализ методов оценки инвестиционной привлекательности акций // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 783–787.
6. Бирюкова С. С. Построение регрессионной модели Шарпа в условиях растущей инфляции и нестабильности фондовых рынков // Экономика и предпринимательство. 2021. № 9 (134). С. 1372–1375. doi: 10.34925/EIP.2021.134.9.266
7. Синчуков А. В. Общие вопросы конструирования и управления портфелем финансовых инструментов // Научные исследования и разработки. Экономика. 2022. Т. 10, № 1. С. 36–43. doi: 10.12737/2587-9111-2022-10-1-36-43
8. Некрасова И. В. Показатель Херста как мера фрактальной структуры и долгосрочной памяти финансовых рынков // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7 (88). С. 87–91.
9. Зиненко А. В. R/S анализ на фондовом рынке // Бизнес-информатика. 2012. № 3 (27). С. 156–159.
10. Зиненко А. В. Закон Парето на фондовом рынке // Финансы и кредит. 2015. № 38 (662). С. 11–19.
11. Negina Y. Reception of Mandelbrot and His Economic Ideas in Russia // Terra Economicus. 2024. Т. 22, № 2. Р. 114–123. doi: 10.18522/2073-6606-2024-22-2-114-123
12. Розенберг Г. С. Фрактальные методы анализа структуры сообществ // Принципы экологии. 2018. № 4 (29). С. 4–43.
13. Zinenko A., Stupina A. Financial time series forecasting methods // ITM Web Conf. II International Workshop Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II 2023). 2024. № 59. Р. 02005. doi: 10.1051/itmconf/20245902005
14. Данилишин А. Р., Голембиовский Д. Ю. Оценка стоимости опционов на основе моделей ARIMA-GARCH с ошибками, распределенными по закону Су Джонсона // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14, вып. 4. С. 83–90.
15. Кошелева Д. Д., Доронина А. В. Преобразование Фурье и быстрое преобразование Фурье // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 38. С. 626–632.
16. Степанов В. В., Липин К. М., Коробейников И. Д. Современные архитектуры интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Научные труды КубГТУ. 2018. № 3. С. 324–334.

17. Зиненко А. В. Алгоритм комбинирования моделей ARIMA и GARCH для прогнозирования биржевых котировок // Экономика и менеджмент систем управления. 2024. № 3 (53). С. 32–41.
18. Грамович Я. В., Мусатов Д. Ю., Петрусевич Д. А. Применения беггинга в прогнозировании временных рядов // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12, № 1. С. 101–110.
19. Zinenko A., Stupina A. A Modification of random forest investment assets selection algorithm // ITM Web Conf. II International Workshop Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-III 2023). 2025. № 72. P. 1002. doi: 10.1051/itmconf/20257201002
20. Xing H.-J., Lio W.-T., Wang X.-Zh. Bounded exponential loss function based Ada-Boost ensemble of OCSVMs // Pattern Recognition. 2024. № 148. P. 110191. doi: 10.1016/j.patcog.2023.110191

References

1. Anastasiadi D.E., Vereshchagin A.A., Pyatakov M.A. Machine learning and its application in various fields, including medicine, finance and production. *Nauchnyy aspekt = Scientific aspect*. 2024;46(4):6166–6174. (In Russ)
2. Garafutdinov R.F. *Modelirovanie i prognozirovanie na finansovykh rynkakh s primeneniem fraktal'nogo analiza: monografiya. = Modeling and forecasting in financial markets using fractal analysis: a monograph*. Perm: Permskij gosudarstvennyj natsional'nyj issledovatel'skij universitet, 2022:95. (In Russ)
3. Abuzov A.Y. Model of investment portfolio optimization in modern conditions. *Finansy i kredit = Finance and credit*. 2024;30(6):1274–1289. (In Russ). doi: 10.24891/fc.30.6.1274
4. Korolev S.A., Yazev M.V., Ermolenko A.A., Dorzh A.V. Comparative analysis of the accuracy of forecasting stock returns using various modifications of the CAPM model. *Finansovaya ekonomika = Financial Economics*. 2020;(3):375–380. (In Russ)
5. Svirin T. Analysis of methods for assessing the investment attractiveness of stocks. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie = Innovations. Science. Education*. 2021;(33):783–787. (In Russ)
6. Biryukova S.S. Construction of the Sharpe regression model in conditions of growing inflation and instability of stock markets. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and entrepreneurship*. 2021;(9):1372–1375. (In Russ). doi: 10.34925/EIP.2021.134.9.266
7. Sinchukov A.V. General issues of designing and managing a portfolio of financial instruments. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki. Ekonomika = Scientific research and development. Economy*. 2022;10(1):36–43. (In Russ). doi: 10.12737/2587-9111-2022-10-1-36-43
8. Nekrasova I.V. Hearst index as a measure of fractal structure and long-term memory of financial markets. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2015;(7):87–91. (In Russ)
9. Zinenko A.V. R/S stock market analysis. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2012;(3):156–159. (In Russ)
10. Zinenko A.V. Pareto's law on the stock market. *Finansy i kredit = Finance and Credit*. 2015;(38):11–19. (In Russ)
11. Negin Y. Reception of Mandelbrot and His Economic Ideas in Russia. *Terra Economicus*. 2024;22(2):114–123. doi: 10.18522/2073-6606-2024-22-2-114-123
12. Rosenberg G.S. Fractal methods for analyzing the structure of communities. *Printsipy ekologii = Principles of ecology*. 2018;(4):4–43. (In Russ)
13. Zinenko A., Stupina A. Financial time series forecasting methods. *ITM Web Conf. II International Workshop Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II 2023)*. 2024;59:02005. doi: 10.1051/itmconf/20245902005

14. Danilishin A.R., Golembiovsky D.Y. Valuation of options based on ARIMA-GARCH models with errors distributed according to Su Johnson's law. *Informatika i ee primeneniya = Informatics and its applications*. 2020;14(4):83–90. (In Russ)
15. Kosheleva D.D., Doronina A.V. Fourier transform and fast Fourier transform. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie = Innovations. Science. Education*. 2021;(38):626–632. (In Russ)
16. Stepanov V.V., Lipin K.M., Korobeynikov I.D. Modern architectures of intellectual decision support systems. *Nauchnye trudy KubGTU = Scientific works of KubSTU*. 2018;(3):324–334. (In Russ)
17. Zinenko A.V. Algorithm of combining ARIMA and GARCH models for forecasting stock quotations. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya = Economics and management of management systems*. 2024;(3):32–41. (In Russ)
18. Gramovich Ya.V., Musatov D.Yu., Petrusevich D.A. Applications of begging in time series forecasting. *Russian Technological Journal*. 2024;12(1):101–110. (In Russ)
19. Zinenko A., Stupina A. A Modification of random forest investment assets selection algorithm. *ITM Web Conf. II International Workshop Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-III 2023)*. 2025;(72):1002. doi: 10.1051/itmconf/20257201002
20. Xing H.-J., Lio W.-T., Wang X.-Zh. Bounded exponential loss function based Ada-Boost ensemble of OCSVMs. *Pattern Recognition*. 2024;(148):110191. doi: 10.1016/j.patcog.2023.110191

Информация об авторах / Information about the authors

Анна Викторовна Зиненко

кандидат технических наук,
доцент кафедры экономической
и финансовой безопасности,
Сибирский федеральный университет
(Россия, Красноярск, пр-кт Свободный, 79)
E-mail: Anna-z@mail.ru

Anna V. Zinenko

Candidate of technical sciences, associate
professor of the sub-department
of economic and financial security,
Siberian Federal University
(79 Svobodny avenue, Krasnoyarsk,
Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 03.06.2025

Поступила после рецензирования/Revised 27.06.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025

СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Р. О. Лавров¹, И. В. Чашин², А. Ю. Иваню³, А. В. Иваню⁴

^{1, 2, 3, 4}Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, Россия
^{1, 2, 3, 4}vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Поднимается проблема снижения статистической погрешности при формировании параметров проецирования оптико-электронных изображений космических объектов с использованием трехмерной оптико-геометрической модели, поскольку применение существующих методов построения таких моделей ограничивается неопределенностью ракурса космического объекта и размеров его геометрических примитивов, что приводит к ошибкам совмещения, выходящим за пределы статистической погрешности. *Материалы и методы.* Для преодоления указанных ограничений при формировании параметров проецирования изображений предлагается вариант построения проективной конфигурации, основанный на использовании механизма восприятия глубины сцены при ее отображении на плоскость изображения. *Результаты.* Разработан алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения, основанный на формальном представлении векторов оптических характеристик элементов конструкции космического объекта и приводящий к снижению неопределенности при разбиении поверхностей на классы эквивалентности по коэффициенту диффузного отражения. *Выводы.* Принципиальное отличие предлагаемого подхода заключается в качественно иной инструментальной поддержке определения коэффициентов диффузного отражения за счет анализа топологии элементов конструкции космического объекта.

Ключевые слова: моделирование космических объектов, статистическая погрешность, геометрические и оптические характеристики, обработка информации

Для цитирования: Лавров Р. О., Чашин И. В., Иваню А. Ю., Иваню А. В. Способ оценивания статистической погрешности оптико-геометрических данных для обработки и анализа информации космических средств // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 153–166. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-12

THE METHOD OF STATISTICAL EVALUATION ERRORS IN OPTICAL AND GEOMETRIC DATA FOR INFORMATION PROCESSING AND ANALYSIS SPACE ASSETS

R.O. Lavrov¹, I.V. Chashchin², A.Yu. Ivanyu³, A.V. Ivanyu⁴

^{1, 2, 3, 4}Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, Russia
^{1, 2, 3, 4}vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The paper raises the problem of reducing the statistical error in the formation of projection parameters of optoelectronic images of space objects using a three-dimensional opto-geometric model, since the use of existing methods for constructing such models is limited by the uncertainty of the angle of the space object and the size of its geometric primitives, which leads to alignment errors beyond the statistical error. *Materials and methods.* To overcome these limitations in the formation of image projection parameters, a variant of constructing a projective configuration based on the use of a mechanism for perceiving the depth of a scene when it is displayed on the image plane is proposed. *Results.* An algorithm for determining diffuse reflection coefficients has been developed based on a formal representation of the optical characteristics vectors of the structural elements of a space object and leading to a reduction in uncertainty when dividing surfaces into equivalence classes according to the diffuse reflection coefficient. *Conclusions.* The fundamental difference between the proposed approach is a qualitatively different instrumental support for determining diffuse reflection coefficients by analyzing the topology of the structural elements of a space object.

Keywords: modeling of space objects, statistical error, geometric and optical characteristics, information processing

For citation: Lavrov R.O., Chashchin I.V., Ivanyu A.Yu., Ivanyu A.V. The method of statistical evaluation errors in optical and geometric data for information processing and analysis space assets. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):153–166. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-12

Введение

В околоземном космическом пространстве находится множество космических объектов (КО). Космические объекты техногенного происхождения, являющиеся космическими средствами (КСр), после окончания срока активного существования переходят в разряд космического мусора, требующего непрерывного контроля [1]. Для проведения мониторинга КО оптико-электронными КСр необходимо наличие оптических характеристик, позволяющих осуществлять достоверное обнаружение и сопровождение объектов наблюдения. Для ряда КО имеются исходные видовые данные, представляющие собой цифровые фотографические изображения. Эти изображения предъявляются разработчиками КСр на этапах монтажных и испытательных работ, проводимых среди прочего в условиях открытого космоса. Для получения оптических характеристик может быть использована трехмерная оптико-геометрическая модель (ОГМ) КО.

Материалы и методы

В общем случае задача построения ОГМ КСр относится к классу обратных некорректных задач, характеризующихся как наличием статистических погрешностей оценок параметров, так и достаточно значимой неопределенностью исходных данных. В связи с этим в работе [2] в качестве решения данной задачи использованы методы обратной пространственной засечки и построения одиночных объектных моделей методами последовательных приближений. С целью снижения неопределенности исходных данных, прежде всего параметров проецирования, в работе [2] сформулированы методы, основанные на использовании маркерных точек для совмещения объекта съемки и геометрической модели КО.

Однако применение этих методов ограничивается неопределенностью ракурса модели КО и размером его геометрических примитивов, что приводит к ошибкам совмещения, выходящим за пределы статистической погрешности. Для преодоления указанных ограничений в работе предлагается алгоритм, основанный на механизме восприятия глубины сцены при ее отображении на плоскость изображения.

Рассмотрим основные свойства изображения, получаемого при центральном проецировании объекта наблюдения на картинную плоскость. Проецирование трехмерного объекта осуществляется с помощью прямых проецирующих лучей, называемых проекторами [3]. Они выходят из центра проекции, проходят через каждую точку объекта и, пересекая картинную плоскость, образуют проекцию. Так как проекция отрезка сама является отрезком, то достаточно спроектировать лишь конечные точки рассматриваемого объекта.

При фотографировании объекта картинная плоскость перпендикулярна оптической оси объектива. Введем систему декартовых координат в объектном пространстве, связанную с картинной плоскостью следующим образом. Ось абсцисс OX расположена по горизонтали (в плоскости местного горизонта), ось ординат OY расположена по вертикали картинной плоскости. Ось аппликат OZ совпадает с оптической осью объектива, направлена в сторону наблюдателя и вместе с осями OX и OY образует правую систему координат (СК). Центр СК $OXYZ$ расположен в точке пересечения оси OZ и ортогональной плоскости OXY , проходящей через некоторую опорную точку (ОТ) объекта наблюдения. Обозначим аппликату центра проекции как $z_{\text{ц}}$ ($z_{\text{ц}} > 0$), а координаты опорной точки в плоскости OXY как (x_o, y_o) . Тогда для любой точки (x, y, z) , принадлежащей проектору, который пересекает плоскость OXY в точке (x_o, y_o) , и имеющей $z < z_{\text{ц}}$, смещения проецированных координат d_x и d_y [2] определяются как

$$d_x = x_o - x = k_n \cdot x, \quad d_y = y_o - y = k_n \cdot y, \quad k_n = \frac{z}{z_{\text{ц}} - z}. \quad (1)$$

С учетом того, что координаты (x, y) являются результатом параллельного проецирования произвольной точки проектора на плоскость OXY , то выражение (1) позволяет осуществлять переход от параллельной проекции трехмерного объекта к центральной проекции в определенной выше системе координат $OXYZ$. Обозначим координаты точки в картинной плоскости как (x_k, y_k) . Исходя из равного масштаба по координатным осям картинной плоскости, соотношения между координатами (x, y) и (x_k, y_k) определяются следующим образом:

$$x_k = \frac{x}{k_m}, \quad y_k = \frac{y}{k_m}, \quad k_m = \frac{|x_2 - x_1|}{|x_{k2} - x_{k1}|} = \frac{|y_2 - y_1|}{|y_{k2} - y_{k1}|}, \quad (2)$$

где k_m – масштабный коэффициент; (x_1, y_1) и (x_2, y_2) – координаты концевых точек отрезка в объектном пространстве; (x_{k1}, y_{k1}) и (x_{k2}, y_{k2}) – координаты точек проекции отрезка в картинной плоскости.

Для построения ОГМ КО используются геометрические примитивы [2], которые позволяют построить в терминах функционально-конструктивных элементов геометрическое описание КО в целом. Назовем объединенный элемент трехмерного представления конструкцией КО. Для отображения трехмерной геометрии на картинную плоскость конструкция КО определяется группой параметров $\{x_o, y_o, z_{\text{ц}}, k_m, \alpha, \beta, \gamma\}$, где $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ – углы разворота строительной СК конструкции КО относительно опорной точки, положение которой в СК OXYZ задается вектором положения $\bar{P} = \{x_o, y_o, z_o\}$.

Обозначим: $\bar{T} = \{x_1, y_1, z_1\}$ – вектор координат концевой точки отрезка в объектном пространстве после сдвига по отношению к центру примитива и поворота относительно опорной точки. Тогда суммарный вектор, который задает координаты точки примитива в СК OXYZ, связанной с центром проекции в объектном пространстве, определяется как

$$\bar{\Sigma} = \bar{P} + \bar{T} = \{\Sigma_x, \Sigma_y, \Sigma_z\}. \quad (3)$$

С учетом выражения (1) смещение проективных координат относительно суммарного вектора $\bar{\Sigma}$ определяется следующим образом:

$$k_n = \frac{\Sigma_z}{z_{\text{ц}} - \Sigma_z}, d_x = \Sigma_x \cdot k_n, d_y = \Sigma_y \cdot k_n. \quad (4)$$

Использование выражений (1)–(4) позволяет вычислить смещения Δx_k и Δy_k координат концевой точки относительно опорной точки на дискретной сетчатке изображения в виде

$$\Delta x_k = \text{Round}\left(\frac{x_1 + d_x}{k_m}\right), \Delta y_k = \text{Round}\left(\frac{y_1 + d_y}{k_m}\right), \quad (5)$$

где $\text{Round}(v)$ – функция округления вещественной переменной v до ближайшего целого.

В выражении (5) результаты вычисления названы смещениями вследствие того, что в системе координат монитора параметр Δy_k необходимо брать с отрицательным знаком. Первоначально выражение (5) может применяться без учета параметров проецирования. В этом случае $d_x = 0$, $d_y = 0$ и имеет место параллельное проецирование. После включения в процесс отображения параметров проецирования и достижения малых отклонений с целью снижения неопределенности исходных данных могут применяться методы, основанные на использовании маркерных точек для совмещения объекта съемки и геометрической модели КО [3]. Однако применение указанных методов недостаточно наглядно отображает результат совмещения с точки зрения учета особенностей центрального проецирования.

При решении прямой задачи по построению центральной проекции для отображения перспективы используют понятие точки схода. Под точкой схода понимается пересечение проекций двух параллельных прямых, лежащих в плоскости, которая не параллельна плоскости проекции [3]. В этом случае используется свойство центрального проецирования: параллельные прямые

в общем случае в изображении не параллельны. На практике для построения точек схода используются концевые точки двух противоположных сторон прямоугольника.

При анализе изображений КО применение точек схода имеет ряд ограничений [4]. Поскольку количество прямоугольных граней КО ограничено видимыми поверхностями, то при геометрическом построении точка схода может выйти за пределы изображения. Процедура построения точки пересечения проекций двух прямых в условиях неопределенности представляется достаточно сложной, поэтому для компактного отображения механизма восприятия глубины воспользуемся свойствами проектора, который является прямым проецирующим лучом, выходящим из центра проекции, проходящим через каждую точку объекта и пересекающим картинную плоскость в точке проекции.

Результаты и обсуждение

Построим в объектном пространстве две пирамиды. Первую пирамиду – с вершиной в центре проекции на оси OZ и с основанием в виде прямоугольного примитива. Вторую пирамиду – с той же вершиной и основанием в виде проекции прямоугольного примитива на плоскость OXY . В этом случае боковые ребра пирамид будут пересекаться, так как они образованы совпадающими проекторами. Если спроецировать пирамиды на картинную плоскость, то получим два четырехугольника, концевые точки которых соединены с общей точкой пересечения оси OZ и плоскости изображения. В соответствии со свойствами центрального проецирования отрезки, соединяющие общую точку пересечения с концевыми точками двух четырехугольников, будут лежать на совпадающих лучах. Полное совпадение двух фигур будет в том случае, если прямоугольный примитив лежит в плоскости OXY . Чем дальше расположен исходный примитив от плоскости OXY , тем больше отличие его от проекции и сильнее восприятие глубины наблюдаемого объекта.

Проиллюстрируем высказанные утверждения на примере схематичного изображения космического телескопа (рис. 1). На рис. 1 представлены проекции пирамид, построенные в соответствии с предложенным алгоритмом. Геометрические примитивы в виде прямоугольников лежат в плоскости поверхности солнечных батарей. Солнечные батареи располагаются в объектном пространстве по разные стороны относительно выбранной плоскости проекции, поэтому четырехугольник центрального проецирования для ближней к наблюдателю солнечной батареи является внешним по отношению к четырехугольнику, полученному посредством параллельного проецирования. Для дальней солнечной батареи имеет место обратное расположение.

Показанная на рис. 1 конфигурация из двух проективных пирамид позволила уточнить координаты опорной точки относительно центра проекции на картинной плоскости. Параметры проецирования, определенные по двум маркерным точкам [5], имели следующие значения: $x_o = 4,6$ м, $y_o = -3,5$ м, $z_u = 227,5$ м. В результате использования описанного выше алгоритма была уточнена координата по оси абсцисс, получившая значение $x_o = 5,1$ м. Соответствующая полученным параметрам конфигурация представлена на рис. 1. Необходимо отметить, что предложенный алгоритм позволяет устранять не только неопределенность параметров проецирования, но и неопределенность ракурса модели КО и размеров его геометрических примитивов, не являющихся опорными.

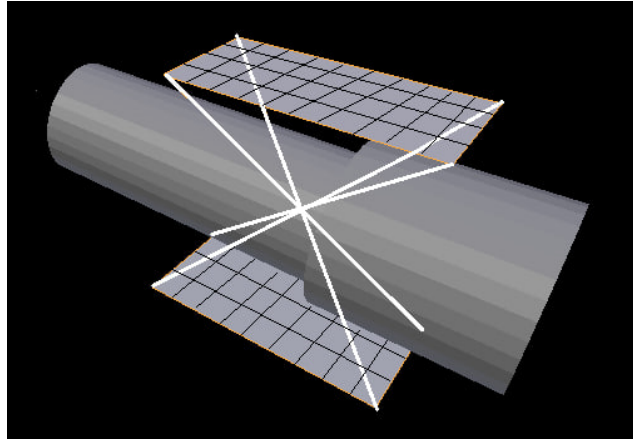


Рис. 1. Схематичное изображение космического телескопа

Следующим шагом при решении задач определения характеристик ОГМ наблюдаемых КО является определение их отражательных характеристик. В общем случае отраженное от поверхности излучение можно представить в виде двух независимых компонент: диффузной и зеркальной [6]. Как правило, при наблюдении КО имеются интервалы времени, в пределах которых на вход оптической системы попадает только диффузно отраженное от КО излучение. Разработанный в исследовании [2] подход позволяет представить КО в виде набора из N геометрических примитивов, имеющих некоторые коэффициенты диффузного отражения, а уравнение для расчета силы отраженного излучения имеет вид

$$I(t) = D_1(t) \cdot \rho_{d1} + D_2(t) \cdot \rho_{d2} + \dots + D_N(t) \cdot \rho_{dN}, \quad (6)$$

где ρ_{di} – коэффициент отражения i -го элемента конструкции; $D_i(t)$ – результат расчета диффузного отражения; $E_{\Delta\lambda}$ – поток солнечного излучения в диапазоне $\Delta\lambda$.

В векторно-матричной форме выражение (6) будет иметь вид

$$I_{u<M>} = D_{[MN]} Rd_{<N>} + \Delta_{<M>}, \quad (7)$$

где $I_{u<M>}$ – вектор-столбец из M отсчетов силы излучения; $Rd_{<N>}$ – вектор из N уточняемых коэффициентов диффузного отражения; $D_{[MN]}$ – матрица результатов расчета операторов $D_{mn} = D_n(t_m)$ – матрица наблюдения КО; $\Delta_{<M>}$ – вектор-столбец невязок по M измерениям силы излучения.

В соответствии с принципом Гаусса – Лежандра [7] оценка вектора отыскивается при минимизации суммы квадратов невязок:

$$f(Rd_{<N>}) = \sum_{i=1}^M \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^M [I_{ui} - D_{i[N]} Rd_{<N>}]^2. \quad (8)$$

В соответствии с работой [2] оценка $Rd_{<N>}^*$ вычисляется по формуле

$$Rd_{<N>}^* = (D_{[MN]}^T \cdot D_{[MN]})^{-1} D_{[MN]}^T \cdot I_{u<M>}. \quad (9)$$

Основным условием определения коэффициентов диффузного отражения является неособенность матрицы $D_{[MN]}^T D_{[MN]}$ ($\det D_{[MN]}^T D_{[MN]} \neq 0$), оно реализуется при отсутствии линейности между столбцами и строками матрицы наблюдения. Физически это достигается за счет различия в геометрической форме элементов конструкции КО или за счет их различной взаимной пространственной ориентации в строительной системе координат. Это ограничение связано с возникновением подобных по форме фазовых зависимостей, под которыми понимают зависимость величины излучения КО от фазового угла [8, 9].

На рис. 2,а приведены фазовые зависимости силы отраженного излучения от плоской площадки, диффузной и зеркальной сфер, а на рис. 2,б – для матовых (диффузных) цилиндров, у которых оси вращения развернуты на 90 и 45 градусов соответственно.

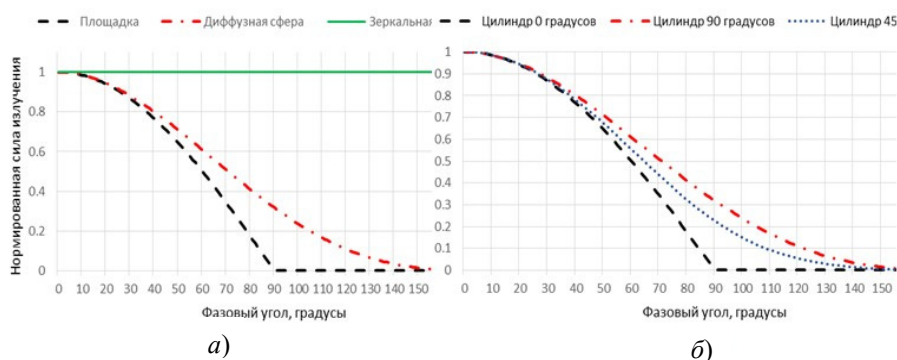


Рис. 2. Пример фазовых зависимостей

Анализ этих зависимостей показывает, что цилиндрические поверхности могут иметь фазовую зависимость излучения как у плоской площадки или как у диффузной сферы. В таком случае мы имеем одинаковые фазовые зависимости отраженного излучения от этих элементов. Решение системы уравнений, в которой из-за одинаковых фазовых зависимостей элементы системы линейны по отношению друг к другу, невозможно.

Для преодоления данного ограничения необходимо провести анализ ОГМ КО и выявить элементы, имеющие одинаковые фазовые зависимости [10]. Например, солнечные батареи можно объединить в один геометрический элемент, так как они однозначно имеют одинаковый материал покрытия и форму с ориентацией. Можно также объединять и другие элементы конструкции, различные по форме, но имеющие одинаковый материал покрытия.

Объединение различных по материалу покрытия элементов конструкции также возможно, однако в этом случае оценки оптических характеристик для такого элемента будут иметь промежуточные значения между фактическими характеристиками каждого элемента, входящего в составной элемент [11]. По результатам анализа принимается решение о группировке тех или иных геометрических элементов (конструкции) КО в один, тем самым осуществляя снижение неопределенности при разбиении поверхностей на классы эквивалентности по коэффициенту диффузного отражения или по фазовым характеристикам.

В итоге получим матрицу меньшей размерности $D_{[M,K]}$, где $K = N - O$, а O – количество объединений элементов конструкции по признаку эквивалентности. Для матрицы $D_{[M,N]}$ объединение элементов конструкции означает сложение этих столбцов.

Ниже предлагается алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения (рис. 3), в котором усовершенствован подход, изложенный в работе [2], за счет анализа топологии элементов конструкции КО.

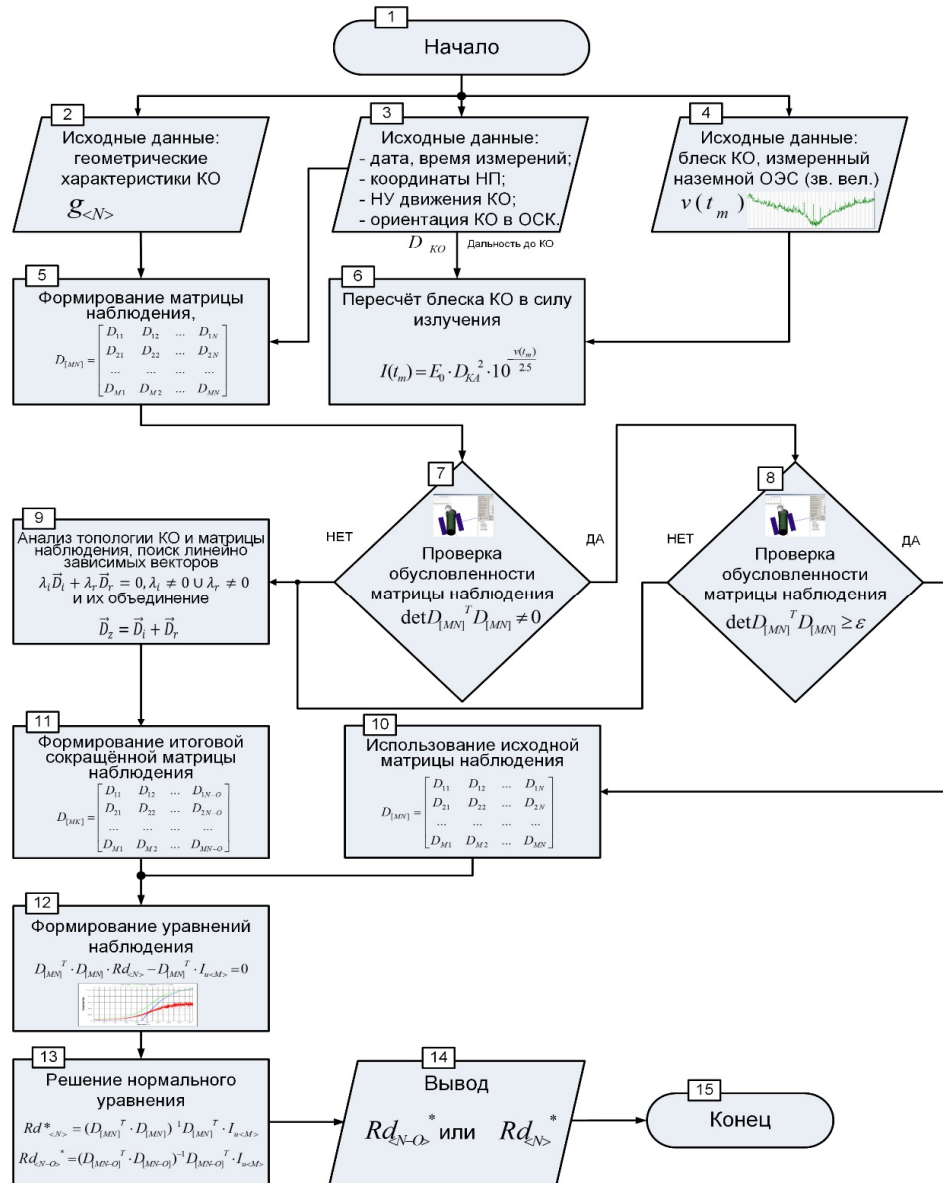


Рис. 3. Алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения

В качестве основного решающего правила используется проверка равенству нулю детерминанта матрицы $D_{[MN]}^T D_{[MN]}$. В случае равенства нулю

детерминанта используется критерий проверки линейности фазовых характеристик элементов конструкции КО для текущего сеанса фотометрических наблюдений посредством определения одинаковых элементов конструкции и/или линейности векторов \vec{D}_p ($p = 1 \dots N$).

Если детерминант не равен нулю, то выполняется дополнительная проверка, позволяющая избежать плохой обусловленности матрицы, приводящая к ошибкам в определении коэффициентов отражения, которые могут получиться отрицательными или быть больше единицы. На возможность определения параметров влияет множество факторов, таких как турбулентность атмосферы, степень изменения ракурсов подсветки и наблюдения, а также сложность и количество элементов ОГМ КСр. Для проверки обусловленности матрицы $D_{[MN]}^T D_{[MN]}$ необходимо ввести критерий, при котором величина детерминанта приведенной матрицы не должна быть меньше порогового значения ε . Однако величина ε варьируется в зависимости от сеанса наблюдений, а также от характеристик ОГМ КО. В настоящее время способа для определения надежного критерия ε авторами не выработано, что является предметом дальнейших исследований. Для общности такая проверка в алгоритме предусмотрена в блоке 8.

На рис. 4 представлены смоделированные траектории движения подспутниковой точки КО и положение Солнца. На увеличенной части отображена траектория движения подспутниковой точки КО непосредственно в ходе сеанса наблюдения. Условия орбитального движения КО выбраны таким образом, что на момент сеанса наблюдения точка наблюдения (координаты 22032'06" ю.ш., 45034'58" з.д.) находится на неосвещенной стороне Земли [12], Солнце зашло более чем на 10 град ниже линии местного горизонта, а КО находится над неосвещенной частью Земли.

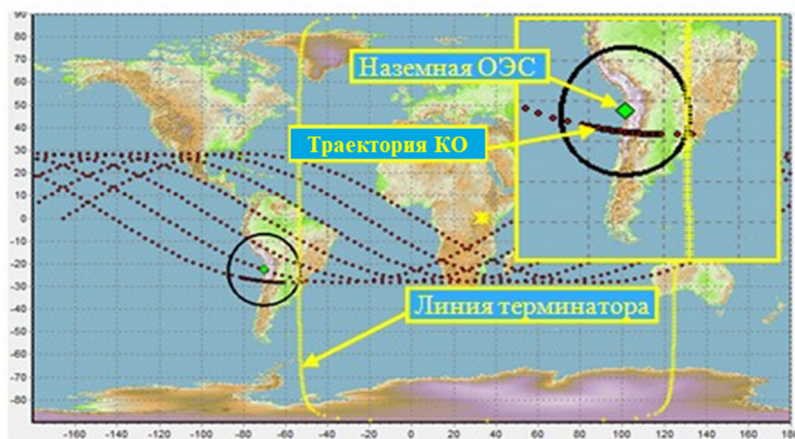


Рис. 4. Траектории движения подспутниковой точки КО

Для работы алгоритма необходимо выполнение условия, когда в поле зрения оптической системы не попадает зеркально отраженное излучение от элементов конструкции наблюдаемого КО. На рис. 5,а представлены результаты моделирования полной силы излучения КО, а также отдельно приведены результаты моделирования зеркально отраженного и диффузно отраженного излучения от КО в целом.

Анализ результатов моделирования показывает, что начиная с 20-й секунды в поле зрения оптической системы не попадает зеркально отраженное излучение от наблюдаемого КО. Таким образом, для дальнейшего формирования матрицы наблюдения и уравнения наблюдения будет использован промежуток времени после 20-й секунды. На рис. 5,б представлена матрица наблюдения для разных частей конструкции КО. Кривая результата наблюдения – это и есть полная сила излучения от КО.

Анализ элементов матрицы наблюдения свидетельствует о совпадении векторов для обеих солнечных батарей и необходимости их объединения в один общий вектор. Анализ векторов корпуса и телескопа показывает их линейную зависимость, а учитывая, что оба этих элемента имеют общий материал покрытия, то в соответствии с предлагаемым алгоритмом эти два вектора необходимо сложить и получить объединенный элемент конструкции.

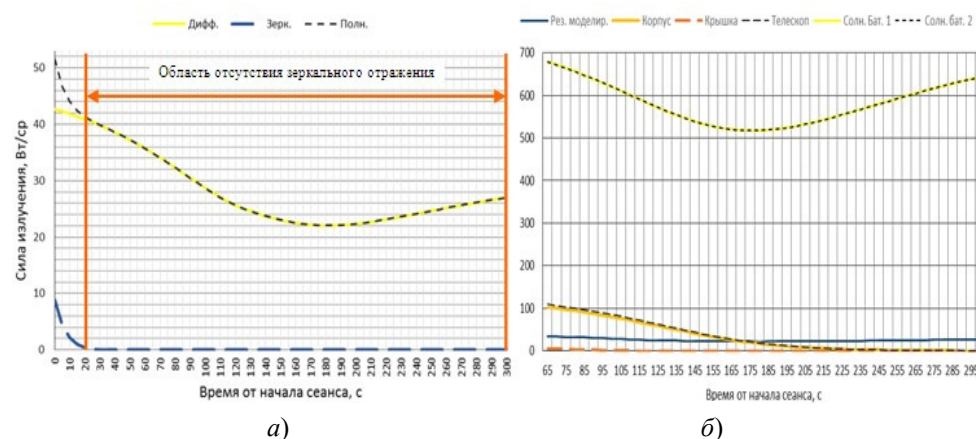


Рис. 5. Реализация силы излучения КО и его матрица наблюдения

На рис. 6 представлены результаты моделирования силы излучения с учетом различных уровней шума атмосферы. С учетом полученных результатов моделирования и в соответствии с алгоритмом были сформированы уравнения наблюдения и получены оценки коэффициентов диффузного отражения.

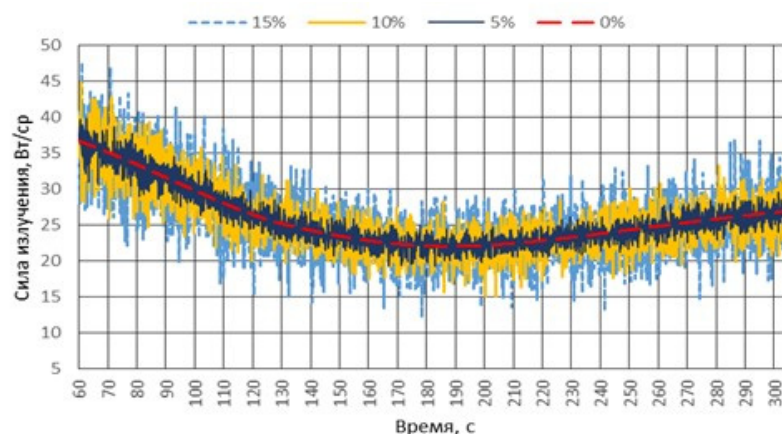


Рис. 6. Зависимость силы излучения КО от различных уровней шума атмосферы

В табл. 1 представлен результат определения коэффициентов диффузного отражения элементов конструкции КО с ошибками определения этих коэффициентов в зависимости от качества измерений.

Таблица 1

Результат определения коэффициентов диффузного отражения
элементов конструкции

Ошибка измерения	0 %		5 %		10 %		15 %	
Элемент (исх. коэф.)	результат	ошибка	результат	ошибка	результат	ошибка	результат	ошибка
корпус (0,009)	0,009	0,004	0,009	2,058	0,009	3,693	0,012	38,333
крышка (0,771)	0,771	0,087	0,766	0,483	0,750	2,658	0,686	10,867
батареи (0,021)	0,021	0,001	0,021	0,349	0,021	0,574	0,021	1,167

Анализ результатов показывает, что ошибки определения диффузных коэффициентов отражения незначительны для измерений, имеющих среднеквадратическую ошибку не более 10 %.

Таким образом, с учетом полученных результатов можно сделать вывод, что вариант построения проективной конфигурации, основанный на использовании механизма восприятия глубины сцены при ее отображении на плоскость изображения, и усовершенствованный алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения элементов конструкции наблюдаемого КО позволяют избежать ошибок при формировании параметров проецирования оптико-электронных изображений КСр, обусловленных зашумленностью атмосферы.

Заключение

Применение способа, основанного на геометрическом описании конструкции КО (совокупности примитивов) и предложенном в работе алгоритме определения коэффициентов диффузного отражения элементов конструкции наблюдаемого объекта, позволяет снизить статистическую погрешность при формировании исходных данных оптико-геометрического моделирования космических объектов в ходе обработки и анализа информации КСр. Предлагаемый в работе вариант построения проективной конфигурации наблюдаемого объекта и алгоритм расчета оценки коэффициентов диффузного отражения также могут быть применимы в различных отраслях промышленности, где требуется повышение точности распознавания наблюдаемого объекта на оптических снимках в зависимости от всевозможных помех среды, в которой осуществляется съемка.

Список литературы

1. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М. : ИКИ РАН, 2013. 216 с. (Серия «Механика, управление и информатика»).
2. Ахметьянов В. Р., Лутов И. О., Олейников М. И. Методы снижения неопределенности исходных данных оптико-геометрического моделирования космических объектов // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 10. С. 19–27.

3. Сиденко Л. А. Компьютерная графика и геометрическое моделирование : учеб. пособие. СПб. : Питер, 2009. 224 с.
4. Chatterjee S., Simonoff S. J. Handbook of regression analysis. John Wiley & Sons, 2013. 218 p.
5. Космический телескоп «Хаббл» // Международный научный сервер. URL: <http://Scientific.ru> (дата обращения: 15.05.2025).
6. Lu X.-P., Jewitt D. Dependence of light curves on phase angle and asteroid shape // Astronomical Journal. 2019. Dec. P. 1–2.
7. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов : пер. с англ. М. : Наука, 1979. 368 с.
8. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. 2-е изд. М. : Высш. шк., 1984. 219 с.
9. Фу К. Структурные методы распознавания образов : пер. с англ. М. : Мир, 1977. 318 с.
10. Калинина Н. Д., Куров А. В. Анализ методов распознавания и поиска образов на космических снимках // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 1. С. 174–188.
11. Golub G. H., Van Loan C. F. Matrix Computations. Fourth edition. Johns Hopkins University Press, 2013. P. 89–90.
12. Gallozzi S., Paris D., Scardia M., Dubois D. Concerns about ground-based astronomical observations: quantifying satellites constellations damages [astro-ph.IM]. 2020. P. 2.

References

1. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora = Space debris modeling*. Moscow: IKI RAN, 2013:216. (In Russ)
2. Akhmetyanov V.R., Lutov I.O., Oleinikov M.I. Methods of reducing the uncertainty of the initial data of optical and geometric modeling of space objects. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aerospace instrumentation*. 2017;(10):19–27. (In Russ)
3. Sidenko L.A. *Komp'yuternaya grafika i geometricheskoe modelirovanie: ucheb. posobie = Computer graphics and geometric modeling: textbook. stipend*. Saint Petersburg: Piter, 2009:224. (In Russ)
4. Chatterjee S., Simonoff S.J. *Handbook of regression analysis*. John Wiley & Sons, 2013:218.
5. The Hubble Space Telescope. *Mezhdunarodnyj nauchnyj server = International Science Server*. (In Russ). Available at: <http://Scientific.ru> (accessed 15.05.2025).
6. Lu X.-P., Jewitt D. Dependence of light curves on phase angle and asteroid shape. *Astronomical Journal*. 2019:1–2.
7. Fukunaga K. *Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov: per. s angl = Introduction to the statistical theory of pattern recognition: transl. from English*. Moscow: Nauka, 1979:368. (In Russ)
8. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya. 2-e izd = Recognition methods. 2nd ed*. Moscow: Vyssh. shk. 1984:219. (In Russ)
9. Fu K. *Strukturnye metody raspoznavaniya obrazov: per. s angl. = Structural methods of pattern recognition: trans. from English*. Moscow: Mir, 1977:318. (In Russ)
10. Kalinina N.D., Kurov A.V. Analysis of image recognition and search methods in satellite images. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Priborostroenie» = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Instrumentation"*. 2012;(1): 174–188. (In Russ)

11. Golub G.H., Van Loan C.F. *Matrix Computations. Fourth edition.* Johns Hopkins University Press, 2013:89–90.
12. Gallozzi S., Paris D., Scardia M., Dubois D. *Concerns about ground-based astronomical observations: quantifying satellites constellations damages [astro-ph.IM]*. 2020:2.

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Олегович Лавров

кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника кафедры
метрологического обеспечения
вооружения, военной
и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Roman O. Lavrov

Candidate of technical sciences,
associate professor, deputy head
of the sub-department of metrological
support of armaments, military and
special equipment,
Mozhaisky Military Aerospace
Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,
Russia)

Игорь Вячеславович Чашин

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры
метрологического обеспечения
вооружения, военной
и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Igor V. Chashin

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department
of metrological support of armaments,
military and special equipment,
Mozhaisky Military Aerospace
Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,
Russia)

Анна Юрьевна Иваню

кандидат технических наук,
начальник учебной лаборатории
кафедры метрологического
обеспечения вооружения, военной
и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Anna Yu. Ivanyu

Candidate of technical sciences,
head of the educational laboratory
of the sub-department of metrological
support of armaments, military and
special equipment,
Mozhaisky Military Aerospace Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,
Russia)

Антон Валерьевич Иваню

начальник курса,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Anton V. Ivanyu

Head of the course,
Mozhaisky Military Aerospace
Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,
Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 26.02.2025

Поступила после рецензирования/Revised 13.04.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И ВАРИАТИВНОСТИ СИГНАЛОВ ЭКГ В НОРМЕ И С ПРИЗНАКАМИ АРИТМИИ

А. В. Адамова¹, К. М. Буданов², А. В. Кузьмин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹alicegarth@gmail.com, ²ko13bud@rambler.ru, ³a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Вычисление и сравнительный анализ параметров variability сердечного ритма и variability сигналов является актуальной задачей классификации аритмичных и нормальных сигналов электрокардиограммы (ЭКГ). Целью являются сравнительный анализ статистических показателей variability сердечного ритма и variability сигналов ЭКГ двумя методами и оценка различий параметров на разных видах сигнала. *Материалы и методы.* В качестве исходных данных выбраны две группы сигналов из открытой базы данных PhysioNet: полученные от здоровых людей и людей, у которых наблюдаются аритмические нарушения. Для данных сигналов были построены гистограммы распределений плотности вероятности их амплитудных характеристик и относительных приращений ряда кардиоинтервалов. Рассчитаны площади несовпадения гистограмм в качестве метрик их различия. *Результаты.* Проведена оценка различия показателей variability сигнала ЭКГ и variability ритма сердца на основе усредненных гистограмм распределений значений сигналов ЭКГ для каждой группы и вычисления отношения площади области несовпадения к общей площади гистограммы, при этом соотношение для первого метода составило 48 %, а для второго – от 33 до 38 % для различных показателей. *Выводы.* Полученные данные показывают потенциальную применимость обоих методов для анализа сигналов ЭКГ на предмет наличия признаков аритмии.

Ключевые слова: статистический показатель, variability, гистограмма, интервал, сигнал ЭКГ

Для цитирования: Адамова А. В., Буданов К. М., Кузьмин А. В. Анализ статистических показателей variability сердечного ритма и variability сигналов ЭКГ в норме и с признаками аритмии // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 167–178. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-13

ANALYSIS OF STATISTICAL INDICATORS OF HEART RATE VARIABILITY AND ECG SIGNAL VARIABILITY NORMALLY AND WITH SIGNS OF ARRHYTHMIA

A.V. Adamova¹, K.M. Budanov², A.V. Kuzmin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia
¹alicegarth@gmail.com, ²ko13bud@rambler.ru, ³a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Abstract. Background. Calculation and comparative analysis of heart rate variability and variability parameters is an urgent task of classification of arrhythmic and normal ECG signals. The objective is a comparative analysis of statistical indicators of heart rate variability and ECG signal variability by two methods and assessment of differences in parameters for different types of signal. **Materials and methods.** Two groups of signals from the open PhysioNet database were selected as initial data: those obtained from healthy people and those with arrhythmic disorders. For these signals, histograms of the probability density distribution of their amplitude characteristics and relative increments of a number of cardiointervals were constructed. The areas of mismatch of the histograms were calculated as metrics of their difference. **Results.** An assessment was made of the difference in the indicators of ECG signal variability and heart rate variability based on the averaged histograms of the distributions of ECG signal values for each group and the calculation of the ratio of the area of the mismatch region to the total area of the histogram, while the ratio for the first method was 48 %, and for the second – from 33 to 38 % for various indicators. **Conclusions.** The obtained data show the potential applicability of both methods for analyzing ECG signals for signs of arrhythmia.

Keywords: statistical indicator, variability, histogram, interval, ECG signal

For citation: Adamova A.V., Budanov K.M., Kuzmin A.V. Analysis of statistical indicators of heart rate variability and ECG signal variability normally and with signs of arrhythmia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(3):167–178. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-13

Введение

Сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) можно рассматривать в качестве основного показателя состояния сердечно-сосудистой системы. Сердце функционирует ритмично, поэтому любое отклонение от ритмического характера сигнала следует интерпретировать как заболевание или аномалию. Однако анализ длительных сигналов ЭКГ является очень сложной и трудоемкой задачей. Существует множество статистических показателей и методов анализа, применяемых при обработке сигналов ЭКГ, которые могут использоваться при классификации сигналов, состояний и заболеваний [1, 2].

Сигнал ЭКГ, как и большинство биомедицинских сигналов, имеет нестационарные характеристики. Это означает, что характеристики сигнала меняются с течением времени или в зависимости от вида деятельности и состояния здоровья человека. Разработан ряд методик оценки характеристик и классификации сигналов, основанных на статистических показателях.

К характеристикам во временной области относятся, в частности, параметры variability сердечного ритма (BCP). Параметры BCP отражают изменения частоты сердечных сокращений и могут быть измерены в виде RR-интервалов. Разброс интервалов RR наглядно демонстрирует variability сердечного ритма. Для понимания изменчивости временных интервалов RR для различных сигналов используются диаграммы размаха и диаграммы с областями. Описательные статистические показатели, такие как среднее значение, медиана, дисперсия и стандартное отклонение, помогают понять характеристики наборов данных, и эти показатели далее могут использоваться в качестве признаков для классификации и для систем поддержки принятия врачебных решений [3].

Можно выделить основные методики анализа ЭКГ, основанные на следующих статистических методах:

1) определение простейших характеристик временных промежутков (NN-интервалов) между QRS-комплексами в длительной записи ЭКГ (в частности, средняя длина и размах длин интервалов) [4, 5];

2) определение статистических временных показателей, полученных на основе ряда длин NN-интервалов или ряда разностей длин соседних NN-интервалов (в частности, стандартные отклонения длительностей NN-интервалов, вычисленные по 5-минутным или суточным записям ЭКГ) [4, 5];

3) геометрическое представление последовательности длин NN-интервалов или последовательности разности длин соседних NN-интервалов в виде гистограмм плотности распределения [4, 5];

4) спектральный анализ, предполагающий выделение полос высокочастотной, низкочастотной и очень низкочастотной компонент и заключающийся в измерении спектральной плотности мощности на основе подсчета количества NN-интервалов, соответствующих каждой из компонент (применяется к записям ЭКГ длительностью не более 5 минут) [4, 5];

5) нелинейный анализ, основанный на теории хаоса и фрактальной математике, при изучении поведения случайной компоненты биосигнала, зависящей от состояния человека или наличия у него той или иной патологии [4, 5];

6) статистический анализ на основе замены кардиоинтервалов на ряд их относительных приращений (для длительных записей ЭКГ) [6];

7) анализ геометрического представления распределения вариативности ЭКГ-сигнала в виде гистограмм плотности вероятности их амплитудных характеристик [7].

Таким образом, существует довольно большой набор применяемых на практике методик анализа ВСР, в том числе рассчитываемых достаточно сложным образом и имеющих свои ограничения и особенности применения. В то же время для анализа вариативности сигнала ЭКГ может применяться основанный на амплитудной дискриминации способ, который является достаточно простым в технической реализации и пригодным для применения в носимых устройствах. Задача данного исследования состоит в оценке различия показателей вариативности ритма сердца и вариативности сигнала ЭКГ для выборок данных, полученных от пациентов с патологиями сердечно-сосудистой системы и контрольной группы.

Материалы и методы

Одним из способов статистического исследования сигналов ЭКГ является анализ гистограмм, отражающих распределение плотности вероятности их амплитудных характеристик [7].

Рассмотрим цифровой сигнал ЭКГ, представленный совокупностью значений u_i^j , измеренных в определенные моменты времени (отсчеты) в каждом отведении, где $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, k$; n – число отсчетов в отведении; k – число отведений. Таким образом, каждый сигнал состоит из nk значений.

При проведении анализа сигналов ЭКГ необходимо обеспечить их сопоставимость. Исследуемые сигналы могут иметь различную частоту дискретизации и амплитуду, продолжительность по времени, поэтому при проведении

сравнительного анализа необходимо выбирать сигналы, имеющие одинаковую частоту и временную продолжительность. В этом случае число отсчетов для различных сигналов также будет совпадать. Это является критичным для данного способа, поскольку его основной метрикой является отсчет.

Различия в амплитуде сигналов можно устранить путем нормирования значений сигнала по следующей формуле [8, 9]:

$$\widetilde{u}_i^j = \frac{u_i^j - \min_i u_i^j}{\max_i u_i^j - \min_i u_i^j}, \quad (1)$$

где \widetilde{u}_i^j – нормированное i -е значение сигнала в отведении с номером j ; u_i^j – фактическое i -е значение сигнала в отведении с номером j ; $\min_i u_i^j$ – минимальное значение сигнала в отведении с номером j ; $\max_i u_i^j$ – максимальное значение сигнала в отведении с номером j .

Процедура нормирования преобразует диапазон значений каждого отведения для каждого сигнала в интервал от 0 до 1. Таким образом, обеспечивается возможность сравнения данных по различным отведениям одного и того же сигнала ЭКГ, а также одинаковых отведений по различным сигналам.

Для формирования гистограммы по нормированным данным разбиваем диапазон значений сигнала на заранее выбранное число интервалов m и определяем количество значений сигнала, находящихся в границах каждого из интервалов. Для получения наиболее точной формы распределения сигнала необходимо оптимизировать число интервалов.

Если требуется сравнить сигналы, содержащие различное количество отсчетов, то для получения корректных результатов следует рассматривать гистограммы относительных частот – оценок плотности вероятности попадания значений сигнала в тот или иной интервал.

Для оценки различий сигналов ЭКГ также можно использовать метод статистического анализа относительных приращений ряда кардиоинтервалов, предложенный д.м.н. В. Ф. Федоровым [6, 10], в котором основной метрикой является RR-интервал. Реализация данного метода предполагает выполнение следующих операций:

– задание скользящего окна в 200 кардиоинтервалов для последовательной обработки;

– преобразование ряда кардиоинтервалов в ряд логарифмов их относительных приращений: $\tau_n = \lg\left(\frac{T_n}{T_{n-1}}\right)$, где T_n – это длительность кардиоцикла

с номером n , а τ_n – логарифм его относительного приращения по сравнению с предыдущим;

– разделение всех полученных значений логарифмов на положительные и отрицательные;

– вычисление статистических характеристик отдельно для положительных и отдельно для отрицательных значений: мощность полураспределения (доля относительных приращений), мода (M), стандартное отклонение (σ);

– вычисление отдельно для каждого полураспределения «интегрального показателя», показывающего направление динамики регуляции сердечного

ритма (ускорение/замедление): $K = \frac{1}{\sqrt{|M| \sigma}}$;

– вычисление показателя вегетативного баланса – отношения коэффициентов для отрицательного и положительного баланса: $B = K(n) / K(p)$;

– сдвиг окна на 10 кардиоциклов и повторение алгоритма.

Ширина и сдвиг скользящего окна были предложены автором данного метода как некий компромисс между увеличенным размером скользящего окна для повышения математической корректности процедур и оценок, построенных на них, и уменьшенным размером окна для повышения физиологической корректности (при тестах с физической нагрузкой артериальное давление сильно повышается, следовательно, статистические параметры будут сильно отличаться).

Для решения поставленной задачи были выбраны сигналы ЭКГ, находящиеся в базах интернет-ресурса Physionet.org [11]: Mit-bih-normal-sinus-rhythm-database-1.0.0 (ЭКГ здоровых людей, 18 сигналов от разных людей, каждый из сигналов представлен в двух отведениях, частота измерения сигнала 128 Гц) [12] и Mit-bih-supraventricular-arrhythmia-database-1.0.0 (ЭКГ пациентов с наджелудочковой аритмией, 78 сигналов от разных людей, каждый из сигналов представлен в двух отведениях, частота измерения сигнала 128 Гц) [13]. Для обеспечения сравнимости данных было выбрано одинаковое количество значений для каждого сигнала (230 400 отсчетов).

Результаты и обсуждение

Каждый из сигналов в каждой выборке был обработан по двум описанным выше методам. В результате были получены гистограммы распределения амплитуд каждого из сигналов по $m = 32$ интервалам нормированных значений. Далее по каждой выборке была построена усредненная гистограмма. В качестве частоты каждого из интервалов было взято среднее значение частот данного интервала по фактическим гистограммам сигналов выборки.

В качестве показателя вариативности было выбрано отношение площади области несовпадения, применяемое при анализе двумерных изображений [14] между двумя усредненными гистограммами к общей площади гистограммы. Под общей площадью гистограммы понимается площадь гистограммы, соответствующей максимальным частотам (нормального или аритмического распределения) по каждому интервалу:

$$S = \left(\sum_{l=1}^m |f_l^{norm} - f_l^{ar}| \right) / \left(\sum_{l=1}^m \max\{f_l^{norm}, f_l^{ar}\} \right) \cdot 100 \%. \quad (2)$$

По каждому интервалу l были вычислены модуль разности между частотами усредненных гистограмм, соответствующих здоровым людям f_l^{norm} и пациентам с аритмией f_l^{ar} , а также максимальная частота (f_l^{norm} или f_l^{ar}), соответствующая тому или иному распределению.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 1, 2, где по оси абсцисс указаны обозначения интервалов нормированных значений сигнала ЭКГ, а по оси ординат – количество значений сигнала, относящихся к соответствующим интервалам.

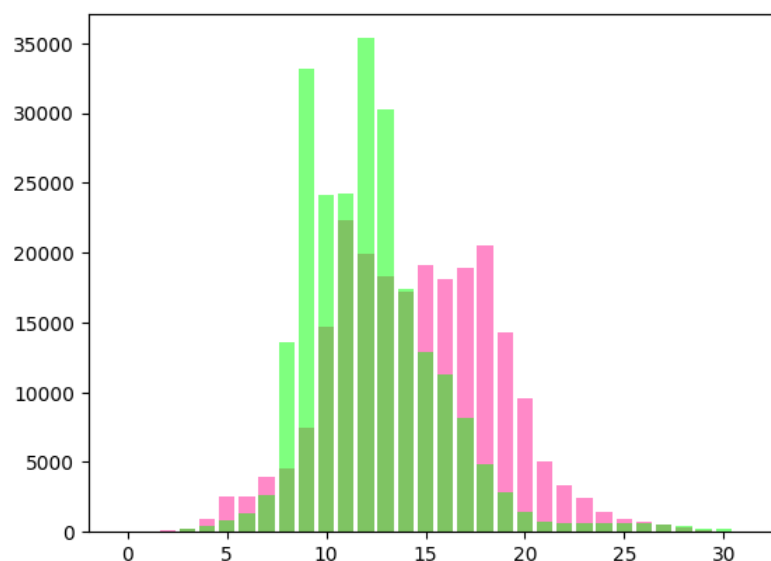


Рис. 1. Усредненные гистограммы распределения сигналов первого отведения, полученные на основе способа определения показателей вариативности временных параметров сигнала ЭКГ (зеленый цвет – норма, розовый – аритмия, темно-зеленый – пересечение значений)

На рис. 1 показано, что на интервалах от 1-го до 7-го наблюдается незначительное различие между распределениями нормальных и аритмичных сигналов с доминированием аритмичного распределения. Интервалы с 8-го по 10-й, а также с 12-го по 13-й представляют собой область заметного расхождения распределений нормальных и аритмичных сигналов с доминированием нормального распределения.

С 16-го по 23-й интервал наблюдается заметное расхождение распределений нормальных и аритмичных сигналов с доминированием аритмичного распределения. При этом диапазон интервалов, на котором существенно преобладает распределение аритмичных сигналов, значительно шире диапазона преобладания распределения нормальных сигналов. Начиная с 24-го интервала можно отметить практическое отсутствие различий между распределениями нормальных и аритмичных сигналов.

В целом можно отметить чередование диапазонов преобладания того или иного распределения сигналов (нормальных или аритмичных). В крайних интервалах диапазона различия распределений сигналов практически отсутствуют.

На рис. 2 показана гистограмма значений, формирующих числитель в формуле (2), полученных с помощью способа анализа геометрического представления распределения вариативности ЭКГ-сигнала.

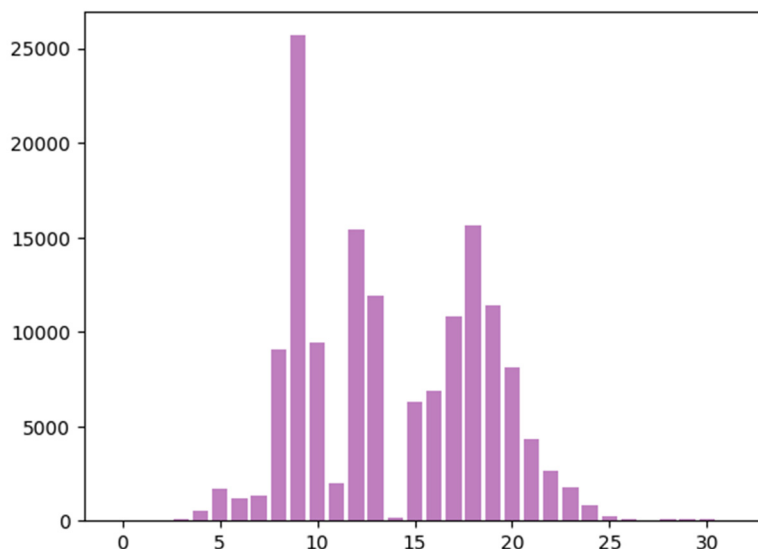


Рис. 2. Область несовпадения гистограмм, полученная способом определения показателей вариативности временных параметров сигнала ЭКГ

Из рис. 2 видно, что область несовпадения гистограмм состоит из двух частей: левая (интервалы от 4-го до 13-го) получена в основном за счет доминирования распределения нормальных сигналов над распределением аритмичных, а правая (от 15-го интервала до 25-го) – за счет доминирования распределения аритмичных сигналов над распределением нормальных.

Можно отметить, что часть крайних интервалов слева (от 1-го до 3-го) и справа (от 26-го до 32-го), а также 14-й интервал не вносят существенного вклада в формирование области несовпадения гистограмм. Наибольший вклад в формирование области несовпадения вносит 9-й интервал, на котором распределение нормальных сигналов доминирует над распределением аритмичных сигналов.

Расчетное значение площади области несовпадения гистограмм составило 147 973, общей площади гистограммы – 304 386. Итоговое значение соотношения площадей равно $S = 48,6 \%$.

На рис. 3 представлены результаты сравнений гистограмм для параметров на основе замены ряда кардиоинтервала на относительные приращения.

Для интегрального показателя обоих рядов значений – как отрицательного (рис. 3,а), так и положительного (рис. 3,б) – с 1-го по 12-й интервал гистограммы преобладают контрольные значения, с 13-го по 17-й заметно доминирование аритмичных, начиная с 18-го интервала появляется различие между этими рядами, в отрицательном продолжает доминирование аритмичных, а в положительном – контрольных.

Начиная с 24-го интервала оба набора значений не демонстрируют заметного преобладания какого-либо набора данных. Для вегетативного баланса (рис. 3,в) 1–5-й интервалы показывают очевидное преобладание контрольных значений; начиная с 6-го интервала появляется групповое чередование аритмичных и контрольных, а с 17-го интервала гистограммы различия между наборами данных практически отсутствуют.

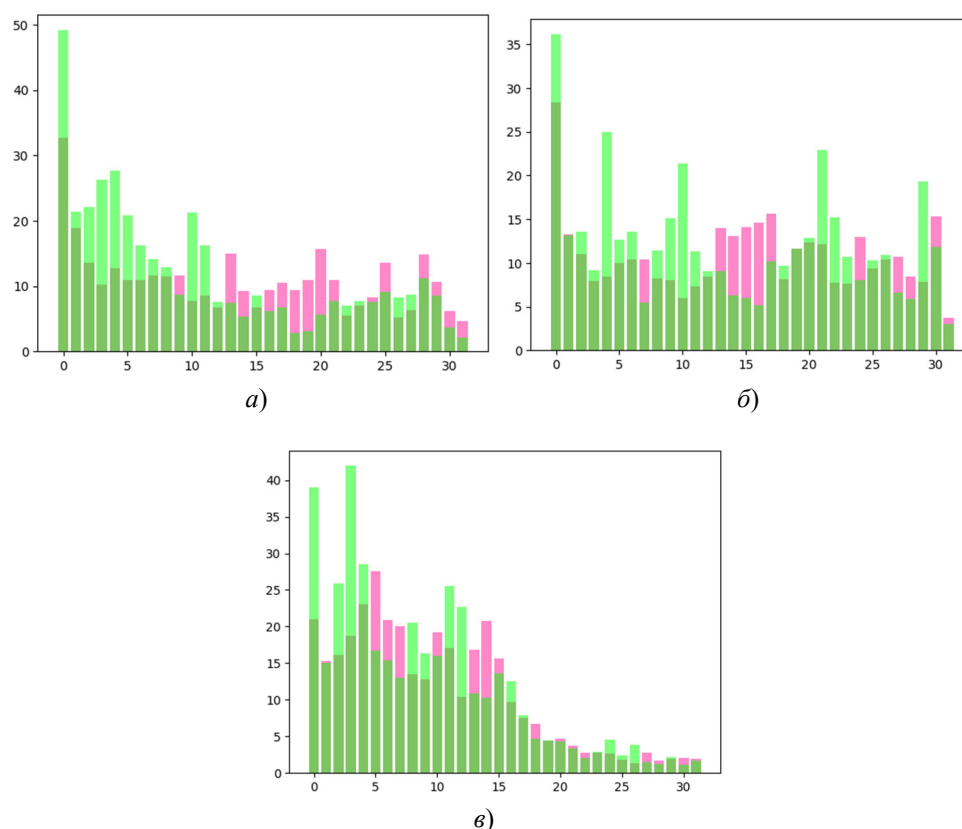


Рис. 3. Гистограммы распределения сигналов первого отведения, полученные с помощью алгоритма статистического анализа относительных приращений ряда кардиоинтервалов:
 а – интегральный показатель отрицательного ряда значений;
 б – интегральный показатель положительного ряда значений;
 в – показатель вегетативного баланса (зеленый цвет – норма, розовый – аритмия, темно-зеленый – пересечение значений)

На рис. 4 показана гистограмма значений, формирующих числитель в формуле (2), полученных с помощью алгоритма статистического анализа относительных приращений ряда кардиоинтервалов.

У интегрального показателя как для отрицательного ряда значений (рис. 4,а), так и для положительного (рис. 4,б), площадь несовпадения очевидна на всей гистограмме, притом если с 1-го по 12-й интервал свой вклад вносит преобладание значений параметров контрольных сигналов, то далее, с 13-го по 17-й интервал, замечен рост влияния аритмичных параметров; правая же часть, начиная с 23-го интервала гистограммы, не может считаться информативной по причине отсутствия доминирования какого-либо набора данных.

На гистограмме вегетативного баланса (рис. 4,в) в крайней левой части доминирование контрольного набора является очевидным; стоит отметить, что наибольшие значения площади несовпадения дают именно параметры контрольных сигналов.

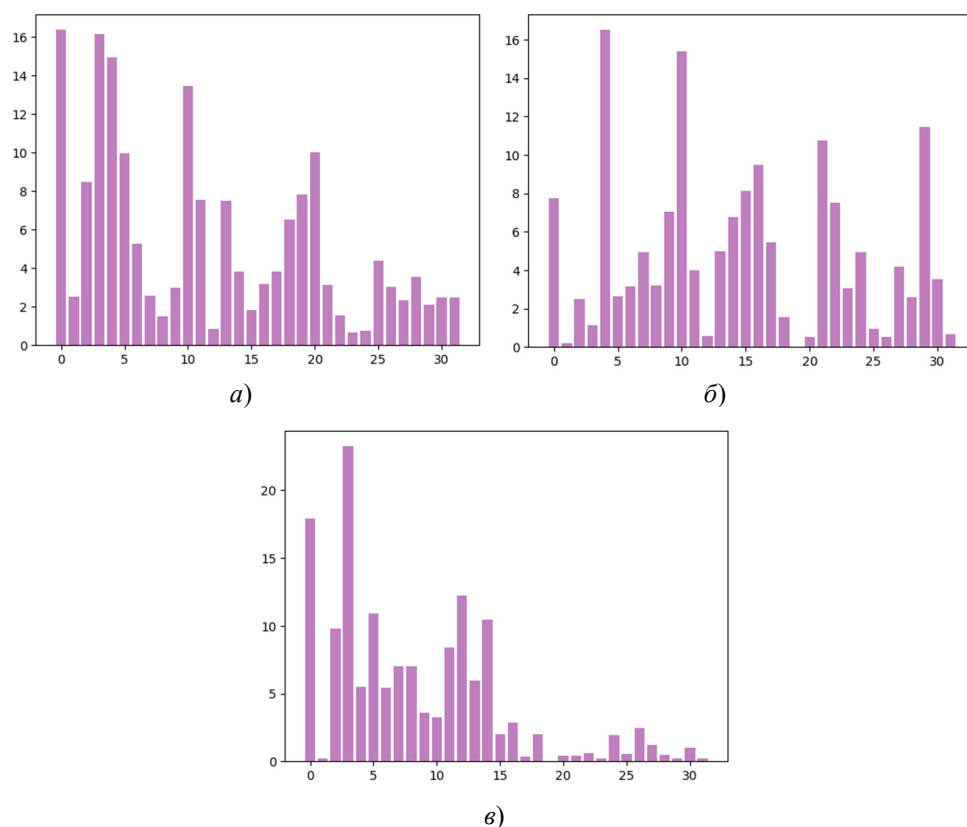


Рис. 4. Область несовпадения гистограмм:
 а – интегральный показатель отрицательного ряда значений;
 б – интегральный показатель положительного ряда значений;
 в – показатель вегетативного баланса

Расчетное значение площади области несовпадения гистограмм по каждому из типов: $K(n)=173,55$, $K(p)=156$ и $B=148,06$. Расчетное значение общей площади гистограмм по типам: $K(n)=456,54$, $K(p)=447,76$ и $B=443,79$. Итоговое значение соотношений площади области несовпадения к общей площади составило по типам: $S_{K(n)}=38\%$, $S_{K(p)}=34,8\%$ и $S_B=33,4\%$. Наиболее значимое различие демонстрирует интегральный показатель отрицательного ряда значений.

Оба способа продемонстрировали значительное различие между областью несовпадения и общей областью гистограммы, что подтверждает их применимость для решения задачи классификации сигналов ЭКГ и выявления участков с признаками аритмии в компьютеризированных медицинских диагностических системах [15].

Поскольку расчеты были проведены только для двух выборок ограниченного объема, в дальнейшем можно исследовать различия между средней гистограммой по каждой выборке и фактическими гистограммами, на основе которых она была получена. Это позволит определить «коридор», в котором могут находиться фактические гистограммы по каждой выборке, и выяснить,

не будет ли перекрытия этих «коридоров» для сигналов, относящихся к различным выборкам. Требуется дальнейшего изучения и вопрос о причинах существования интервалов гистограмм, на которых различия в распределениях нормальных и аритмичных сигналов отсутствуют.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования было выявлено, что гистограммы, соответствующие сигналам ЭКГ условно здоровых людей и сигналы ЭКГ признаками аритмии, отличаются между собой. В качестве метрики использовалась величина площади области несовпадения гистограмм, которая оказалась отличной от нуля.

Проведена оценка различия показателей вариативности сигнала ЭКГ и вариабельности ритма сердца на основе усредненных гистограмм распределений значений сигналов ЭКГ для каждой группы и вычисления отношения площади области несовпадения к общей площади гистограммы, при этом соотношение для первого метода составило 48 %, а для второго – от 33 до 38 % для различных показателей. Полученные данные показывают потенциальную применимость обоих способов анализа параметров сигнала ЭКГ для обнаружения признаков аритмии.

Список литературы

1. Clifford G. D., Azuaje F., McSharry P. Advanced Methods And Tools for ECG Data Analysis. New York : Artech House Publishers, 2006. 400 p.
2. Bajaj V., Sinha G. R. Modelling and Analysis of Active Biopotential Signals in Healthcare. IOP Publishing, 2020. Vol. 1. 443 p. (IPEM–IOP Series in Physics and Engineering in Medicine and Biology).
3. Демушкина К. М., Демушкин М. О., Кузьмин А. В. Обзор методов проектирования систем поддержки принятия врачебных решений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 75–89. doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-6
4. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании электрокардиографических систем. Методические рекомендации // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.
5. Task force of the european society of cardiology and the north american society of Pacing and electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // European heart journal. 1996. № 17. P. 354–381.
6. Fedorov V. F. Time series analysis in self-regulating systems // Journal of Radio Electronics. 2019. № 5. С. 1–10.
7. Патент № 2827482 С1 Российская Федерация, МПК А61В 5/352. Способ определения показателей вариативности временных параметров электрокардиографического сигнала / Кузьмин А. В., Гасанова В. А., Пушкарева А. В. [и др.] – № 2023127657 ; заявл. 27.10.2023 ; опубл. 27.09.2024.
8. Glantz S. A. Primer of biostatistics. 7 ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 312 с.
9. Мамаев А. Н., Кудлай Д. А. Статистические методы в медицине. М. : Практическая медицина, 2021. 136 с.
10. Fedorov V. F., Stolyar V. L. Heart Rate Variations Analysis: Traditions, Misconceptions, Perspectives // 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow, 2021. P. 1–5.
11. Goldberger A. L., Amaral L. A. N., Glass L. [et al.]. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals // Circulation. 2000. № 101 (23). P. 215–220.

12. MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database. URL: <http://www.physionet.org/physiobank/database/nsrdb/> (дата обращения: 16.05.2025).
13. MIT-BIH Supraventricular Arrhythmia Database. URL: <http://www.physionet.org/physiobank/database/svdb/> (дата обращения: 16.05.2025).
14. Патент № 2372844 C1 Российская Федерация, МПК A61B 6/00, A61B 5/107. Способ автоматического определения размеров и положения сердца пациента по флюорографическим снимкам / Бодин О. Н., Кузьмин А. В., Семенкин М. А., Моисеев А. Е. – № 2008123240/14 ; заявл. 16.06.2008 ; опубл. 20.11.2009.
15. Rangayyan R. M., Krishnan S. *Biomedical Signal Analysis*. Wiley, 2024. doi: 10.1002/9781119825883

References

1. Clifford G.D., Azuaje F., McSharry P. *Advanced Methods And Tools for ECG Data Analysis*. New York: Artech House Publishers, 2006:400.
2. Bajaj V., Sinha G.R. *Modelling and Analysis of Active Biopotential Signals in Healthcare*. IOP Publishing. 2020;(1):443.
3. Demushkina K.M., Demushkin M.O., Kuzmin A.V. Review of design methods for medical decision support systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):75–89. (In Russ) doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-6
4. Baevsky R.M., Ivanov G.G., Chireikin L.V. Analysis of heart rate variability using electrocardiographic systems. Methodical recommendations. *Vestnik aritmologii = Bulletin of Arrhythmology*. 2001;(24):65–87. (In Russ)
5. Task force of the european society of cardiology and the north american society of Pacing and electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European heart journal*. 1996;(17):354–381.
6. Fedorov V.F. Time series analysis in self-regulating systems. *Journal of Radio Electronics*. 2019;(5):1–10.
7. Патент № 2827482 C1 Russian Federation, MPK A61B 5/352. *A method for determining the variability of time parameters of an electrocardiographic signal*. Kuz'min A.V., Gasanova V.A., Pushkareva A.V. et al. № 2023127657; appl. 27.10.2023; publ. 27.09.2024 (In Russ)
8. Glantz S.A. *Primer of biostatistics. 7 ed*. New York: McGraw-Hill, 2012:312.
9. Mamaev A.N., Kudlay D.A. *Statisticheskie metody v meditsine = Statistical methods in medicine*. Moscow: Prakticheskaya meditsina, 2021:136. (In Russ)
10. Fedorov V.F., Stolyar V.L. Heart Rate Variations Analysis: Traditions, Misconceptions, Perspectives. *23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. Moscow, 2021:1–5.
11. Goldberger A.L., Amaral L.A.N., Glass L. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation*. 2000;(101):215–220.
12. MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database. Available at: <http://www.physionet.org/physiobank/database/nsrdb/> (accessed 16.05.2025).
13. MIT-BIH Supraventricular Arrhythmia Database. Available at: <http://www.physionet.org/physiobank/database/svdb/> (accessed 16.05.2025).
14. Патент № 2372844 C1 Russian Federation, MPK A61B 6/00, A61B 5/107. *A method for automatically determining the size and position of a patient's heart from fluorographic images*. Bodin O.N., Kuz'min A.V., Semenkin M.A., Moiseev A.E. № 2008123240/14; appl. 16.06.2008; publ. 20.11.2009. (In Russ)
15. Rangayyan R.M., Krishnan S. *Biomedical Signal Analysis*. Wiley, 2024. doi: 10.1002/9781119825883

Информация об авторах / Information about the authors

Алиса Викторовна Адамова
аспирант, ассистент кафедры
информационно-вычислительных
систем, Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alicegarh@gmail.com

Alisa V. Adamova
Postgraduate student, assistant of the
sub-department of information and
computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Константин Михайлович Буданов
старший преподаватель кафедры
информационно-вычислительных
систем, Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ko13bud@rambler.ru

Konstantin M. Budanov
Senior lecturer of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Викторович Кузьмин
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
информационно-вычислительных
систем, Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuzmin
Doctor of technical sciences, associate
professor, head of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 10.01.2025

Поступила после рецензирования/Revised 13.05.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025