

Эмпирический анализ и стратегическое моделирование для устойчивого развития и управления рисками

Цифровая трансформация и возрастающая сложность глобальных социально-экономических систем требуют от исследователей и практиков применения комплексных методов анализа данных и моделирования. Широкий спектр задач включает макроэкономическое планирование и оценку устойчивых финансовых инструментов, построение эффективных систем управления внутри организации.

Во втором выпуске журнала «Sustainable Development and Engineering Economics» за 2025 год авторы рассматривают применение современных количественных и качественных методов для поиска управленческих решений на различных уровнях

В статье Дергачева, Бекетова и Гинцяка «Сравнение инструментов и методов формирования команды IT-проекта в контексте разработки каскадных и гибких проектов» рассматривается одна из ключевых проблем управления проектами в условиях цифровизации. Авторы проводят систематический обзор и сравнительный анализ моделей и инструментов формирования команд. Исследование выявляет существующий методологический разрыв между гибкими и каскадными подходами и обосновывает необходимость разработки многокритериальных методов оптимизации для повышения стабильности и предсказуемости команд в Waterfall-проектах.

Исследование Терешко и Северюхиной «Анализ рыночных рисков при разработке системы риск-менеджмента в авиакомпании» посвящено задаче повышения устойчивости бизнеса к кризисам. Применяя комплекс качественных и количественных методов, таких как построение тепловых карт рисков и формирование онтологических схем стейкхолдеров, авторы показывают, что интеграция риск-менеджмента с системами качества и безопасности, а также его цифровизация являются ключевыми факторами для адаптации компаний к новой рыночной реальности.

Статья Маврина и Брусаковой «Модульная архитектура аналитической платформы здравоохранения с обезличенной обработкой данных» предлагает архитектурное решение проблемы цифровизации здравоохранения – работы с данными при строгих требованиях конфиденциальности. Используя методы системного анализа и архитектурного моделирования, авторы разработали концепцию платформы, которая позволяет проводить сложную аналитику и прогнозное моделирование без прямого доступа к персональным данным пациентов, обеспечивая гибкость развертывания и полный суверенитет над данными.

В работе Гутман, Егоровой и Новиковой «Эффект гриниум на рынке корпоративных облигаций в странах Евросоюза» представлен эмпирический анализ феномена устойчивых финансов. Исследование сфокусировано на выявлении и количественной оценке «зеленой» премии для корпоративных облигаций Германии, Испании и Нидерландов. Регрессионный анализ подтвердил статистическую значимость эффекта, наиболее выраженного для испанских эмитентов, и продемонстрировал определяющую роль национальной макроэкономической специфики, что крайне важно для формирования как инвестиционных стратегий, так и государственной политики.

В статье Шарикова, Поляковой и Кудрявцева «Кластерный анализ экономического развития провинций Таиланда» авторы применяют кластерный анализ для выявления структурных паттернов развития 77 провинций Таиланда. Результаты выявили три устойчивых кластера и подтвердили гипотезу о росте пространственного неравенства, что доказывает необходимость использования инструментов анализа данных для разработки адресной и дифференцированной региональной политики.

*Ирина Рудская, главный редактор журнала SDEE,
доктор экономических наук, профессор*

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Дергачев, М., Бекетов, С., Гинцяк, А.</i> Сравнение инструментов и методов формирования команды IT-проекта в контексте разработки каскадных и гибких проектов.....	7
<i>Терешко, Е., Северюхина, А.</i> Анализ рыночных рисков при разработке системы риск-менеджмента в авиакомпании	25
<i>Маврин, Д., Брусакова, И.</i> Модульная архитектура аналитической платформы здравоохранения с обезличенной обработкой данных.....	48
<i>Гутман, С., Егорова, М., Новикова, Е.</i> Эффект гриниум на рынке корпоративных облигаций в странах Евросоюза.....	66
<i>Шариков, Н., Полякова, П., Кудрявцев, А.</i> Кластерный анализ экономического развития провинций Таиланда.....	84

TABLE OF CONTENTS

<i>Dergachev, M., Beketov, S., Gintciak, A.</i> Comparison of Tools and Methods of Forming an IT Project Team in the Context of Cascading and Flexible Project Development	8
<i>Tereshko, E., Severyukhina, A.</i> Analysis of Market Risks in the Development of an Airline's Risk Management System	26
<i>Mavrin, D., Brusakova, I.</i> Modular Architecture of a Healthcare Analytics Platform with De-Identified Data Processing	49
<i>Gutman, S., Egorova, M., Novikova, E.</i> The Greenium Effect in the Corporate Bond Market of EU Countries	67
<i>Sharikov, N., Poliakova, P., Kudryavtsev, A.</i> Cluster Analysis of the Economic Development of the Provinces of Thailand	85

Научная статья

УДК 519.8

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.1>

СРАВНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ И МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНДЫ ИТ-ПРОЕКТА В КОНТЕКСТЕ РАЗРАБОТКИ КАСКАДНЫХ И ГИБКИХ ПРОЕКТОВ

Максим Дергачев*, Сальбек Бекетов, Алексей Гинцяк

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, maksim.dergachev@spbpu.com, salbek.beketov@spbpu.com, aleksei.gintciak@spbpu.com

*Автор, ответственный за переписку: maksim.dergachev@spbpu.com

Аннотация

В условиях цифровой трансформации одним из ключевых факторов успешной реализации ИТ-проектов становится формирование сбалансированных проектных команд. Цель исследования заключается в выявлении и сравнительном анализе инструментов, позволяющих учитывать специфику каскадной и гибкой методологий управления проектами. Объектом исследования выступает процесс подбора и распределения специалистов в командах ИТ-проектов. В качестве методов применялись критический обзор научных публикаций, сравнительный анализ моделей и инструментов командообразования, а также их систематизация по степени применимости к Agile и Waterfall. В ходе работы были выделены пять основных моделей (нечеткая когнитивная, регрессионная, системный анализ, алгоритм на основе грейдов и опыта, деревья компетенций) и шесть инструментов (экспертная оценка, теория игр, системный анализ, одно- и многокритериальная оптимизация, имитационное моделирование). Сравнение показало, что большинство подходов ориентировано на однокритериальную оптимизацию, в то время как применение многокритериальных методов для Waterfall остается ограниченным. Результаты исследования позволили установить методологический разрыв между гибкими и каскадными подходами, особенно в части учёта коммуникативных и динамических факторов. Сделан вывод о необходимости развития инструментов многокритериальной оптимизации для каскадных проектов, что повысит устойчивость и предсказуемость состава команд. Представленные материалы могут быть использованы руководителями проектов, HR-специалистами и исследователями в области управления командами.

Ключевые слова: методы оптимизации, формирование команды, ИТ-проекты, гибкая методология, каскадная методология.

Цитирование: Дергачев, М., Бекетов, С., Гинцяк, А., 2025. Сравнение Инструментов и Методов Формирования Команды ИТ-Проекта в Контексте Разработки Каскадных и Гибких Проектов. Sustainable Development and Engineering Economics 2, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.1>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Дергачев, М., Бекетов, С., Гинцяк, А., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.1>

COMPARISON OF TOOLS AND METHODS OF FORMING AN IT PROJECT TEAM IN THE CONTEXT OF CASCADING AND FLEXIBLE PROJECT DEVELOPMENT

Maxim Dergachev*, Salbek Beketov, Aleksei Gintciak

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, maksim.dergachev@spbpu.com, salbek.beketov@spbpu.com, aleksei.gintciak@spbpu.com

*Corresponding author: maksim.dergachev@spbpu.com

Abstract

In the context of digital transformation, the formation of well-balanced project teams has become one of the critical factors for the successful implementation of IT projects. The aim of this study is to identify and compare tools that take into account the specifics of both waterfall and agile project management methodologies. The object of the study is the process of selecting and allocating specialists within IT project teams. The research methodology included a critical review of scientific publications, comparative analysis of team formation models and tools, and their systematization according to their applicability to Agile and Waterfall approaches. The analysis identified five key models (fuzzy cognitive, regression, system analysis, grading and experience-based algorithm, skill trees) and six main tools (expert evaluation, game theory, system analysis, single- and multi-criteria optimization, simulation modeling). The comparison showed that most approaches focus on single-criteria optimization, while the use of multi-criteria methods for Waterfall projects remains limited. The results revealed a methodological gap between agile and waterfall practices, particularly in terms of communication and dynamic factors. The study concludes that the development of multi-criteria optimization tools for Waterfall projects is necessary to enhance team stability and predictability. The findings may be useful for project managers, HR specialists, and scholars in the field of project team management.

Keywords: IT-projects, optimisation methods, team formation, waterfall methodology, agile methodology.

Citation: Dergachev, M., Beketov, S., Gintciak, A., 2025. Comparison of Tools and Methods of Forming an IT Project Team in the Context of Cascading and Flexible Project Development. Sustainable Development and Engineering Economics 2, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.1>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Dergachev, M., Beketov, S., Gintciak, A., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Развитие цифровой экономики и активная трансформация бизнес-процессов в последние десятилетия обусловили не только рост числа реализуемых IT-проектов, но и значительное усложнение их организационной структуры (Bukht, Heeks, 2017; George, Paul, 2020). Успех проектов информационных технологий напрямую зависит от человеческого фактора: квалификации специалистов, сбалансированности их компетенций, распределения ролей и качества взаимодействия внутри команды (Driskell, Salas and Driskell, 2018; Salas, Reyes and McDaniel, 2018; Mahmoudpour, Gholipour and Carmen Galang, 2025; (Pinto and Slevin, 1987). Несмотря на прогресс в области автоматизации процессов и применения интеллектуальных систем поддержки управления, именно формирование проектных команд остается одной из наиболее значимых и в то же время сложных задач современного управления IT-проектами.

В условиях высокой динамики внешней среды компании сталкиваются с необходимостью оперативно адаптироваться к изменяющимся требованиям рынка и запросам заказчиков, что, в свою очередь, подчеркивает актуальность проблемы выбора адекватных инструментов и методов формирования команд, позволяющих учитывать не только профессиональные компетенции участников, но и их личностные характеристики, уровень коммуникабельности, способность к совместной деятельности и потенциал развития (Driskell, Salas and Driskell, 2018; Salas, Reyes and McDaniel, 2018; Hoda, Noble and Marshall, 2012). Важным фактором становится необходимость формализованной оценки эффективности команд, которая позволяет прогнозировать результативность выполнения проекта и минимизировать управленческие риски.

Эффективное управление такими проектами включает в себя подбор оптимальной команды специалистов с использованием различных методов формирования команды (Dergachev and Beketov, 2024; (Luan and Xie, 2024). Выбор подходящего метода формирования команды позволяет повысить продуктивность работы, минимизировать риски и сократить сроки выполнения проекта (Pinto and Slevin, 1987). Однако необходимо учитывать соответствие выбранного инструмента методологии разрабатываемого проекта, поскольку каждая методология обладает своими особенностями и ограничениями.

Традиционная каскадная модель характеризуется строгой последовательностью этапов, высокой степенью формализации и необходимостью тщательного планирования ресурсов на ранних стадиях (Rouse, 1987). В таких условиях формирование устойчивой и предсказуемой команды является критически важным фактором успеха. Гибкие методологии, напротив, предполагают итеративность разработки, постоянную обратную связь с заказчиком и способность команды к быстрой адаптации (Serrador and Pinto, 2015; Vidgen and Wang, 2009; Chow and Cao, 2008; Dingsøyr, Moe and Seim, 2018; Sutherland and Sutherland, 2014; Conforto et al., 2014). В проектах с данной методологией ценность приобретают такие аспекты, как кросс-функциональность, самоорганизация, распределенное лидерство и высокая степень вовлеченности участников (Poppendieck and Poppendieck, 2003; Hoda, Noble and Marshall, 2012; Boehm and Turner, 2003). Следовательно, выбор инструментов формирования команды должен быть обусловлен не только характеристиками специалистов, но и спецификой используемой методологии управления.

Существующие исследования в данной области предлагают широкий спектр методов – от экспертных оценок и системного анализа (Mesarovic and Takahara, 1975) до имитационного

моделирования, алгоритмов оптимизации (Deb et al., 2002; Luan and Xie, 2024) и применения элементов теории игр (Myerson, 2013). Однако анализ показывает, что значительная часть этих методов фокусируется преимущественно на однокритериальной оптимизации (например, сроков или стоимости проекта), что ограничивает их применимость в условиях реальных проектов, где необходимо учитывать комплекс факторов. Более того, многие из рассмотренных моделей либо недостаточно адаптированы к гибким методологиям, либо не учитывают специфики каскадного подхода, что формирует методологический разрыв и снижает эффективность управленческих решений (Vidgen and Wang, 2009; Luan and Xie, 2024; Boehm and Turner, 2003).

Научная новизна исследования заключается в постановке задачи комплексного анализа и сопоставления инструментов формирования команд IT-проектов в контексте двух ключевых методологий – каскадной и гибкой. С практической точки зрения актуальность обусловлена необходимостью разработки и внедрения методов, обеспечивающих многокритериальную оптимизацию состава команды, что позволяет учитывать не только производственные показатели, но и факторы взаимодействия, доверия, распределения ролей и компетентностного соответствия.

Целью настоящего исследования является анализ существующих методов и моделей формирования команд IT-проектов, выявление их преимуществ и ограничений, а также определение возможностей их применения в зависимости от используемой методологии управления проектом.

2. Материалы и методы

3.1. Исходные данные

Объектом исследования выступает процесс формирования проектных команд в сфере информационных технологий при реализации проектов по каскадной и гибкой методологиям. Предмет исследования – совокупность методов и инструментов, позволяющих оценивать компетенции специалистов, распределять их по ролям и прогнозировать результативность работы команды.

В качестве методологической базы исследования использовался комплексный подход, включающий анализ литературы, в частности, критический обзор современных публикаций, посвященных моделям командообразования в IT-проектах. Помимо данного подхода применялся сравнительный анализ методов – оценка существующих моделей (когнитивные модели, регрессионный анализ, системный анализ, алгоритмы распределения, деревья компетенций, имитационное моделирование) с точки зрения их применимости к Waterfall и Agile.

На первом этапе исследования был проведен критический анализ публикаций по проблеме формирования команд в IT-проектах.

На следующем этапе для дальнейшего изучения были выделены пять базовых моделей:

- нечеткая когнитивная модель оценки компетенций;
- регрессионная модель предиктивного анализа;
- системный анализ с комплексным подбором специалистов;
- моделирующий алгоритм, основанный на грейдах и опыте;

- модель деревьев профессиональных навыков.

И шесть основополагающих инструментов:

- Экспертная оценка
- Теория игр
- Системный анализ
- Однокритериальная оптимизация
- Многокритериальная оптимизация
- Имитационное моделирование

Далее методы сравнивались друг с другом, оценивалась их основная идея, преимущества и недостатки, а у инструментов оценивалась применимость к Agile и Waterfall проектам. Сравнение представлено в таблицах.

3. Результаты

Существует несколько методов и моделей, помогающих эффективно организовать работу команды и обеспечить успешное выполнение IT-проекта. Эти методы и модели основаны на различных подходах к управлению проектами, подбору персонала, распределению ролей и обязанностей, а также оценке компетенций.

Модель формирования команды может базироваться на использовании нечеткой когнитивной модели оценки компетенций (Azhmuhamedov and Azhmuhamedov, 2011), которая нацелена на оптимальный подбор команды из множества кандидатов и распределение их по задачам проекта таким образом, чтобы минимизировать разрыв между требуемыми для выполнения задач компетенциями и фактическими компетенциями исполнителей. Процесс формирования команды в рамках данной модели состоит из двух этапов. На первом этапе проводится тщательная оценка уровня компетенций каждого кандидата с использованием технологий тестового контроля, результаты которого затем оцениваются группой экспертов, что позволяет получить объективную картину профессиональных навыков и знаний каждого претендента. На втором этапе, основываясь на анализе данных, полученных на первом этапе, осуществляется отбор наиболее подходящих исполнителей для реализации каждой конкретной задачи проекта. Важной особенностью методики является возможность варьирования весов связей (дуг), соединяющих концепты нечеткой когнитивной модели. Такие изменения позволяют адаптировать модель под конкретные требования проекта и целенаправленно подбирать специалистов с необходимыми компетенциями. Такой подход предоставляет кадровым службам более обоснованный и целенаправленный механизм подбора персонала. В целом, эта модель предполагает не только оценку, но и последующее развитие компетенций каждого члена команды для определения сильных и слабых сторон каждого сотрудника и распределения задач таким образом, чтобы максимально использовать потенциал каждого, создавая сбалансированную команду, где каждый вносит свой вклад в общий успех проекта.

Предиктивный метод определения результативности команды IT-проекта может реализоваться с применением регрессионного анализа (Afonin, 2020). Данный метод нацелен на прогнозирование результативности команды IT-проекта на основе анализа корреляции между характеристиками команды и результатами ее деятельности. Модель, использующая

регрессионный анализ, стремится определить, какие именно характеристики команды оказывают наибольшее влияние на ее успешность. Для проведения оценки используется специализированный электронный ресурс, анализирующий множество различных параметров, характеризующих команду. Данные о характеристиках команд собираются с помощью анкетирования, а полученные результаты нормализуются и анализируются с использованием регрессионного анализа, например, в программном обеспечении Excel. Это позволяет выявить статистически значимые связи между составом команды и ее производительностью.

Другой подход заключается в использовании модели формирования команды, основанной на системном анализе и комплексном подходе к подбору специалистов (Khitrova, Ovanesyana and Nizovtseva, 2020). Модель включает в себя детальный анализ требований проекта, определение необходимых ролей и компетенций, а также тщательную оценку и отбор кандидатов на основе их профессиональных навыков, опыта и личностных качеств. Особое внимание в этой модели уделяется сбалансированному распределению ролей внутри команды, что способствует оптимизации взаимодействия между участниками, минимизации конфликтов и повышению общей эффективности работы. Системный подход позволяет учитывать взаимосвязи между различными элементами команды и проекта, что способствует созданию более устойчивой и работоспособной структуры.

Определять эффективность составленной команды можно также с использованием моделирующего алгоритма, который принимает на вход такие параметры, как функциональная роль сотрудника, коэффициент его эффективности, определяемый «грейдом» (уровнем квалификации), и опыт работы (Khadzhieva, 2018). Алгоритм сначала определяет необходимое количество команд и сортирует всех разработчиков по их эффективности. Затем разработчики распределяются по командам таким образом, чтобы в каждой команде присутствовали как сильные, так и менее опытные разработчики. Такой подход позволяет сбалансировать силы внутри команд, обеспечить передачу знаний и опыта, а также создать более устойчивые и эффективные рабочие группы.

Еще один подход к формированию команды IT-проекта — это моделирование с применением деревьев профессиональных навыков (Shushkov, 2008). Каждый сотрудник описывается набором параметров, включающих его должность, профессиональные навыки и процент занятости в других проектах. Профессиональные навыки и умения каждого сотрудника организуются в виде дерева компетенций, где корни и ветви представляют различные уровни навыков (например, базовый, средний, продвинутый), а листья — конкретные навыки с максимальным весом, указывающим на экспертный уровень владения. Заказ на проект также описывается в виде дерева задач, где каждая задача имеет определенные требования к навыкам и количество человеко-часов, необходимых для ее выполнения. Сопоставление деревьев навыков сотрудников с деревом задач проекта позволяет определить, насколько команда соответствует требованиям проекта и какие навыки необходимо усилить или привлечь дополнительно.

Сравнение данных методов и подходов к формированию команды IT-проекта приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение подходов к формированию команды IT-проекта

Метод/Модель	Основная идея	Преимущества	Недостатки
Нечеткая когнитивная модель оценки компетенций	Минимизация разрыва между требуемыми и фактическими компетенциями кандидатов.	Целенаправленный подбор специалистов, возможность адаптации модели под конкретные требования, учет развития компетенций.	Сложность формализации экспертных оценок, субъективность оценки компетенций, статичность модели (не учитывает динамику развития компетенций во времени).
Регрессионный анализ (предиктивный метод)	Прогнозирование результативности на основе корреляции характеристик команды и результатов.	Возможность выявления факторов, влияющих на результативность, опора на статистические данные.	Зависимость от качества и объема данных, сложность учета неформальных факторов, влияющих на результативность (например, командный дух), корреляция не всегда означает причинно-следственную связь.
Системный анализ и комплексный подход	Анализ требований проекта, определение ролей и компетенций, сбалансированное распределение ролей.	Комплексный учет требований, ролей и компетенций, акцент на взаимодействии внутри команды.	Сложность формализации системного анализа, субъективность оценки соответствия кандидатов требованиям, отсутствие четких критериев сбалансированности.
Моделирующий алгоритм (грейд и опыт)	Распределение разработчиков по командам с учетом грейда и опыта для создания сбалансированных команд.	Простота реализации, учет опыта и квалификации разработчиков, создание команд с разным уровнем подготовки.	Упрощенный подход к оценке эффективности (только грейд и опыт), не учитывает другие важные факторы, такие как личностные качества, коммуникабельность, специализация, не учитывает динамику развития команды.
Деревья профессиональных навыков	Сопоставление дерева компетенций сотрудников с деревом задач проекта	Наглядное представление компетенций и требований, возможность выявления	Сложность построения и актуализации деревьев компетенций и задач, статичность модели, не

Метод/Модель	Основная идея	Преимущества	Недостатки
	для определения со-ответствия требованиям.	недостающих навы-ков.	учитывает динамику развития навыков и изменение требований проекта, не учитывает взаимодействие в ко-манде, а фокусируется только на наличии необ-ходимых навыков у отдельных сотрудников, не учитывает распреде-ление ролей, а только наличие компетенций.

Исходя из сравнения видно, что большинство методов учитывают различный уровень компетенций сотрудников, однако не во всех подходах применяется ролевая структура команды вместе с их уровнем навыков. Помимо этого, учитываются требования самого проекта по составу команды. Деревья компетенций позволяют определить несоответствие команды требованиям в конкретном аспекте. Коммуникационную составляющую учитывает только метод, основанный на системном анализе, несмотря на ее влияние на производительность команды и необходимость ее учета в процессе формирования команды.

Рассмотренные в исследовании модели и методы формирования команд могут быть встроены в существующую классификацию способов принятия управленческих решений (Dergachev and Beketov, 2025). Системный анализ занимает место в группе формализованных методов как самостоятельный подход. Среди математических моделей статистическое направление представлено регрессионным анализом, а аналитическое направление включает такие методы, как нечеткая когнитивная модель, моделирующий алгоритм на основе грейдов и опыта и деревья профессиональных навыков, которые позволяют формализовать процесс сопоставления компетенций и проектных задач. Встроенные в классификацию методы и модели представлены на рисунке 1.

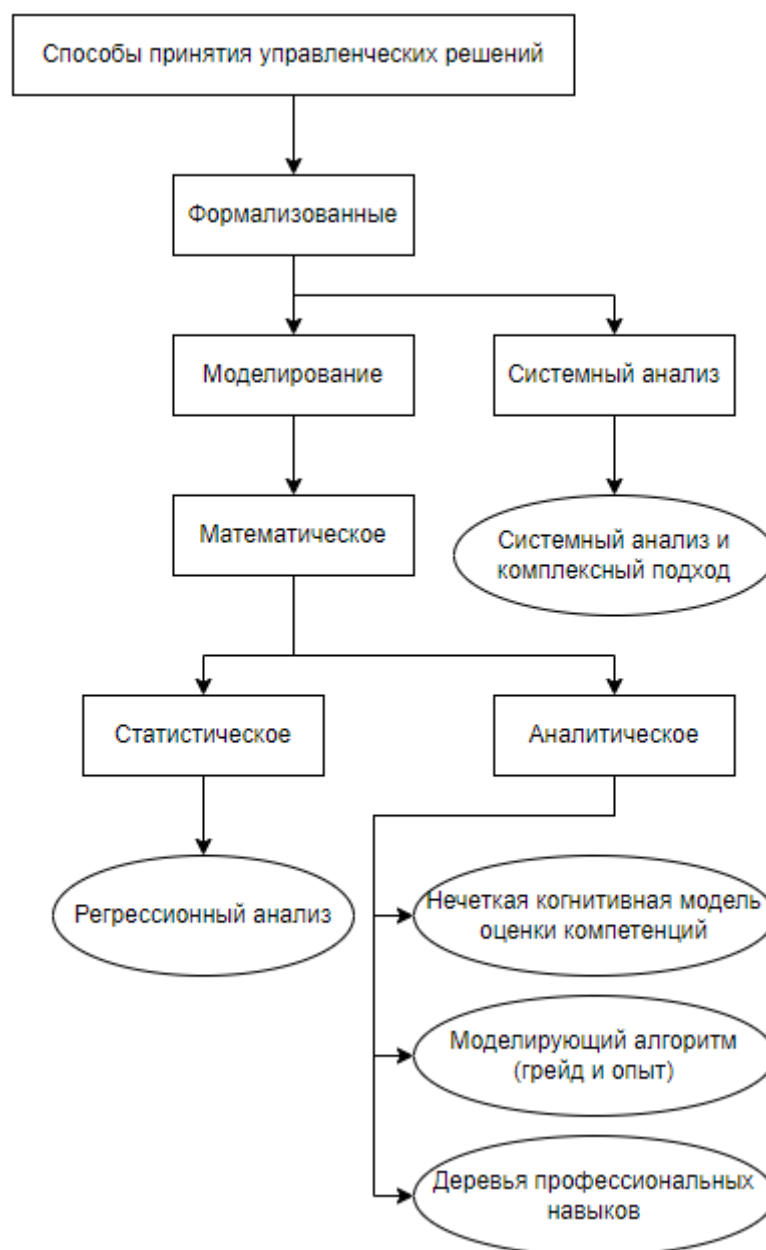


Рисунок 1. Встроенные в классификацию методы и модели

Помимо представленных моделей существует большое количество инструментов для решения схожих задач (Dergachev and Beketov, 2024). Среди формализованных методов принятия решений выделяют экспертные оценки, системный анализ и различные виды моделирования, в том числе аналитическое и имитационное.

При формировании команды с помощью оценок экспертов привлекаются специалисты с опытом в области IT. С их помощью производится анализ требований проекта и подбирается оптимальный состав команды. Эксперты оценивают различные компетенции кандидатов, их уровень квалификации, креативность, опыт и способность работы в команде. Недостатком этого метода является присутствующая субъективность оценки из-за влияния человеческого фактора при анализе кандидатов.

Применение системного анализа рассматривает команду как сложную систему и в процессе формирования которой необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов. При этом подходе производится моделирование структуры команды, определение ключевых компетенций, анализ взаимозависимости ролей и оценку потенциальных рисков. Использование системного анализа позволяет рассмотреть задачу формирования команды максимально подробно, что предоставляет хороший результат, однако требует огромного количества затраченных ресурсов и информации, что не всегда возможно в контексте управления современными IT-проектами.

Использование теории игр при формировании команды подразумевает собой анализ стратегий взаимодействия между участниками, учитывающие интересы, мотивация, возможности сотрудничества и конкуренции отдельных членов команды. С помощью теоретико-игровых моделей возможно предсказывать поведение участников при межличностном взаимодействии, оптимально распределить роли в команде, что способствует продуктивной работе над IT-проектом. В частности, этот метод полезен при нахождении баланса между личными интересами участников и эффективностью команды в целом.

Формирование команды может осуществляться с использованием математических методов однокритериальной оптимизации. Данный подход используется при необходимости оптимизировать команду для максимизации или минимизации одного критерия, таких как максимальной производительности, минимальной стоимости, минимальных рисках или наибольшего инновационного потенциала. В качестве примера такого метода может быть приведено линейное программирование. Оно позволяет оптимизировать целевую функцию, в данном случае значение выбранного критерия, с учетом различных ограничений. Такой подход возможен при наличии четкого приоритета, однако он не учитывает взаимодействие между членами команды, динамику развития команды и другие важные аспекты.

Многокритериальная оптимизация, в отличие от предыдущего метода, учитывает набор конкретных критериев, таких как стоимость содержания команды, срок выполнения проекта, взаимодействие между участниками, на основе которых формируется команда. Такой подход позволяет соблюсти баланс между различными факторами, сравнить альтернативные варианты и найти компромиссное решение, благодаря чему получается более сбалансированная команда. Примером такого подхода может быть Парето-оптимизация, при котором ни один показатель системы не может быть улучшен без ухудшения какого-либо другого показателя, предоставляя набор оптимальных составов команд для выбора соотношения между значениями выбранных критериев.

Имитационное моделирование заключается в создании симуляции команды определенного уровня абстракции. Данный вид инструмента дает возможность прогнозировать исход выполнения проекта в зависимости от начальной команды, что позволяет делать выводы по поводу ее состава и необходимости внесения изменений. Использование агентного моделирования или систем динамического моделирования помогает анализировать взаимодействие участников, тестировать различные сценарии реализации проекта и оценивать влияние изменений состава команды на успешность проекта. Данный метод позволяет выявить возможные проблемы и улучшить процессы управления командой до начала реализации IT-проекта.

В современных IT-проектах для управления на данный момент лидирует различные реализации методологии Agile, подход которой заключается в итеративной разработке,

адаптации к изменениям и тесном взаимодействии с заказчиком. В связи с этим описанные методы и модели, основанные на базе этих методов, больше применяются в данной методологии и более проработаны именно для нее. Примеры использования методов при формировании команды в методологиях Waterfall и Agile приведено в таблице 2.

Таблица 2. Применимость инструментов формирования команды в различных методологиях

	Waterfall	Agile
Экспертная оценка	(Beilkhanov and Kvyatkovskaya, 2012; Ampuero and Abreu, 2021; Raibulet and Fontana, 2018)	
Теория игр	(Gintciak, 2023; Vaida, 2019)	(Nikitina et al., 2023; Vershinina, Zvereva and Shabunin, 2024)
Системный анализ	(Zzkarian and Kusiak, 1999; Afolabi, Chukwurah and Abieba, 2025)	
Однокритериальная оптимизация	(Dehghani and Trojovský, 2021; Daniel and Odon, 2021)	(Kuz'mina and P'yankova, 2024; Song and Paczek, 2023)
Многокритериальная оптимизация	—	(Zhang and Zhang, 2013; Qu et al., 2023)
Имитационное моделирование	(Saravanos and Curinga, 2023; Bassil, 2012)	(Lunesu et al., 2021; Cao, Ramesh and Abdel-Hamid, 2010; White, 2014)

Метод экспертных оценок основан на сборе мнений экспертов для формирования количественных и качественных оценок кандидатов. Он применяется при сложном выборе из множества альтернатив и требует формализованных критериев оценки. В статье (Beilkhanov and Kvyatkovskaya, 2012) в качестве критериев приводится множество K состоящее из k_1 (знание принципов ООП), k_2 (освоенные языки программирования), k_3 (опыт программирования) и k_4 (участие в командных проектах). Далее эксперты присваивают значения этим критериям и упорядочивают их по важности. После этого производится оценка погрешности и вычисление итогового показателя конкретного кандидата с помощью математического метода SMART. На третьем этапе оценивается надежность с помощью модели доверия кандидатов относительно друг друга и делается вывод о целесообразности включения кандидата в команду. Данный подход позволяет формировать команду при наличии большого количества условий и ограничений, он учитывает конкретные особенности реализуемого проекта, благодаря чему он может быть адаптирован и к другим проектам, однако субъективность оценок может послужить причиной ошибочности результирующего состава команды и привести к провалу проекта. Помимо этого, эксперты должны обладать достаточным уровнем знаний и компетенций в данной области для точности оценивания. Данный метод применим и в каскадных, и в гибких методологиях.

Теоретико-игровые инструменты рассматривают процесс формирования команды как игру, в которой у агентов (членов команды, управляющего) есть возможность придерживаться одной из набора стратегий.

В статье (Gintciak, 2023) рассмотрено моделирование проекта с применением данного инструмента. В качестве участников выступают члены команды проекта. Помимо этого, описаны шаги для реализации частной модели, которая применима к формированию команды IT-проекта по каскадной методологии. Данный метод позволяет формировать команду с учетом стратегического поведения участников, что особенно важно для распределенных и кросс-функциональных IT-команд, однако сложность вычислений и необходимость точного определения параметров игроков могут стать ограничением. В статье (Nikitina et al., 2023) в качестве агентов выступают следующие типы участников команды: «делает вид, что ищет», «ищет самостоятельно», «ищет совместно с другими участниками команды». В результате моделирования игры получаются оценки данного набора команды, состоящей из различных типов агентов.

Метод аналитического иерархического процесса (АИП) и развертывания функции качества (QFD) основан на системном анализе требований проекта и инженерных характеристик для формирования оптимального состава команды. В статье (Zzkarian and Kusiak, 1999) предлагается использовать QFD-матрицу для сбора данных о потребностях клиентов и инженерных требованиях, а затем применять АИП для построения иерархической модели с уровнями: цель, критерии, кандидаты. Для оценки важности инженерных характеристик и кандидатов проводится парное сравнение, после чего формируется математическая модель целочисленного программирования, позволяющая оптимально распределить участников по ролям. Данный метод обеспечивает объективный выбор кандидатов, учитывает как технические, так и «мягкие» факторы (например, лидерство и командные ценности) и позволяет адаптировать команду под разные проекты. Однако он требует значительных вычислительных ресурсов, а процесс сравнений может быть трудоемким. Метод применим в гибридных подходах, таких как Scrum + Lean, SAFe, а также в более структурированных методологиях, например, Waterfall.

Метод однокритериальной оптимизации, представленный в статье (Dehghani and Trojovský, 2021), основан на алгоритме оптимизации командной работы (ТОА), который моделирует взаимодействие членов команды для минимизации или максимизации функции. В ТОА каждый агент рассматривается как член команды, который обучается у более опытных участников (включая «супервайзера» – наиболее эффективного члена). Алгоритм включает три этапа: 1) руководство супервайзера, 2) обмен информацией между членами команды и 3) индивидуальная активность для улучшения показателей. Такой подход позволяет эффективно находить квази-оптимальные решения сложных задач, избегая локальных минимумов. ТОА демонстрирует высокую скорость сходимости и конкурентоспособность по сравнению с классическими алгоритмами оптимизации (например, PSO, GA). Однако его недостатком является необходимость тонкой настройки параметров и возможная неэффективность на задачах с сильно ограниченным пространством поиска.

Метод однокритериальной оптимизации основан на определении ключевого показателя эффективности команды и его максимизации или минимизации в зависимости от целей проекта. В статье (Kuz'mina and P'yankova, 2024) рассматривается подход к формированию кросс-функциональной команды и расчету ее скорости, который позволяет оценить предельную нагрузку команды и оптимально распределить задачи. В качестве критерия оптимизации используется трудозатраты на спринт, рассчитываемые по формуле с учетом количества членов команды, их продуктивности, рабочего времени и влияния митингов. Оптимизация

проводится путем нахождения такого состава команды и распределения нагрузки, которые обеспечивают максимальную эффективность без перегрузки. Метод позволяет повысить предсказуемость выполнения задач и сбалансировать ресурсы, однако требует корректировки в зависимости от специфики команды (например, уровня компетенций участников). Он наиболее применим в гибких методологиях, таких как Scrum и Kanban, где важно учитывать производительность команды в спринтах.

Метод многокритериальной оптимизации, представленный в статье (Zhang and Zhang, 2013), основан на использовании культурного алгоритма (МОСА) для формирования команд в социальных сетях с учетом нескольких факторов: стоимости коммуникации, уровня экспертности, коллективного доверия и географической близости. В модели вводятся динамические показатели, учитывающие временные изменения экспертности и затрат на коммуникацию, а также новая формула для оценки доверия через профильное сходство и эмоциональный интеллект. Метод позволяет находить оптимальные команды, но требует значительных вычислительных ресурсов. Он применим в гибких методологиях управления проектами, таких как Scrum и Kanban.

Имитационное моделирование основано на создании дискретно-событийной модели для оценки времени завершения проекта и оптимизации распределения ресурсов. В статье (Saravanos and Curinga, 2023) используется Python и фреймворк SimPy для симуляции каскадной модели разработки, где проекты разделяются на этапы анализа, проектирования, реализации, тестирования и поддержки. На первом этапе задаются начальные параметры ресурсов (аналитики, дизайнеры, программисты и т.д.) и длительность этапов. Затем запускается симуляция для выявления узких мест. На финальном этапе анализируются результаты, включая время завершения проекта и вероятность ошибок на каждом этапе. Данный метод позволяет точно прогнозировать сроки и минимизировать простои. Однако он требует глубокого понимания процессов разработки и точности в настройке модели, а также может быть ограничен предположениями, не всегда соответствующими реальным условиям.

В статье (Lunesu et al., 2021) симулятор использует данные из JIRA для моделирования Agile-процессов и выполняет стохастическое моделирование с помощью метода Монте-Карло. На первом этапе данные о задачах, разработчиках и их навыках импортируются из JIRA, затем задаются параметры риска, такие как ошибки в оценке усилий и случайное распределение задач. После запуска множества симуляций анализируются ключевые показатели, такие как время завершения проекта и количество реализованных задач, с учетом их распределения и перцентилей.

Данные методы представляют различные подходы к формированию команды IT-проекта. Экспертная оценка, теория игр и системный анализ предлагают структурированные способы выбора кандидатов, однако экспертная оценка подвержена субъективности, а теория игр требует сложных вычислений. Системный анализ обеспечивает объективность за счет математических моделей, но является ресурсозатратным.

Методы однокритериальной и многокритериальной оптимизации, а также имитационного моделирования обеспечивают оптимизацию состава проектной команды, предлагая сбалансированный подход между точностью расчетов и вычислительной сложностью. Помимо этого, в эти методы могут быть интегрированы различные инструменты как, например, метод Монте Карло.

Исходя из таблицы можно сделать вывод, что большинство методов применяются как в проектах, реализуемых по каскадной методологии, так и по гибким методологиям. Однако в результате анализа литературы был выявлен пробел в области применения многокритериальной оптимизации в проектах, управляемых по каскадной методологии.

4. Обсуждение

Полученные результаты позволяют выявить несколько значимых закономерностей в области формирования команд IT-проектов. Прежде всего, было установлено, что подавляющее большинство подходов сфокусировано на решении задач однокритериальной оптимизации. Такие методы, ориентированные, например, исключительно на сокращение сроков или снижение стоимости, действительно позволяют получить быстрое и формально корректное решение, однако они оказываются излишне ограниченными в условиях реальных проектов. Практика показывает, что узкая настройка по одному критерию способна привести к нежелательным побочным эффектам, например ухудшению качества коммуникаций или росту организационных рисков. Особенно критичным это становится для проектов, реализуемых по каскадной модели, где изменение состава команды после этапа планирования практически невозможно. Отдельного внимания заслуживает тот факт, что коммуникационный фактор системно недоучитывается большинством существующих моделей. Из проанализированных подходов лишь системный анализ в явном виде закладывает коммуникативную составляющую в качестве переменной. Остальные методы ограничиваются косвенными оценками или вообще игнорируют этот аспект, что повышает вероятность формирования команды, которая будет обладать нужным набором компетенций, но окажется неспособной эффективно взаимодействовать. В условиях гибких методологий данный недостаток отчасти компенсируется итеративностью и ретроспективами, однако в Waterfall-проектах это ограничение приобретает принципиальное значение.

Выявлена и ещё одна важная особенность: большинство моделей статичны по своей природе. Деревья навыков и нечеткие когнитивные модели дают удобный «моментальный снимок» состояния команды, но плохо отражают динамику роста или угасания компетенций, эффекты наставничества и перераспределение ролей. Именно поэтому их прогностическая точность снижается на длинных горизонтах планирования и требует сочетания с имитационным моделированием либо периодической перекалибровки параметров. Регрессионные и иные предиктивные модели также обладают очевидными ограничениями. Их результаты сильно зависят от качества исходных данных и часто фиксируют лишь корреляции, не раскрывая причинно-следственных связей. В условиях подбора проектных команд это приводит к консервации устоявшихся паттернов и формированию предубеждений против новых организационных практик, которые не находят подтверждения в исторических данных. Особую критику заслуживают алгоритмы распределения участников по командам на основе грейдов и опыта. Несмотря на простоту и удобство, такие алгоритмы чрезмерно упрощают действительность: они игнорируют специализации, личностную совместимость, а также межкомандные зависимости. В результате организации могут получать локально оптимальные решения, которые не обеспечивают устойчивости на уровне портфеля проектов.

Наиболее значимый вывод исследования заключается в том, что многокритериальная оптимизация, активно развивающаяся в контексте Agile, остается практически неразработанной для каскадных проектов. Ситуация выглядит парадоксально, поскольку именно Waterfall характеризуется высокой зависимостью от устойчивости и предсказуемости состава команды, а

значит, требует комплексного учета множества факторов еще на ранних стадиях проектирования. Результаты сопоставления согласуются с международной научной повесткой. В последние годы активно обсуждаются проблемы межкомандных зависимостей и ограниченность метрик, ориентированных исключительно на внутригрупповые показатели. Исследования в области психологической безопасности, доверия и командного взаимодействия демонстрируют их прямое влияние на результативность, однако эти аспекты редко включаются в формальные модели подбора. В работах, посвященных интеграции гибких практик в каскадные среды, фиксируется методологический разрыв между документально ориентированным управлением и итеративной реализацией. Таким образом, данное исследование уточняет международный дискурс, показывая, где именно известные подходы оказываются непригодными, и какие характеристики должны иметь модели, чтобы быть эффективными в Waterfall-контексте.

Вместе с тем необходимо обозначить ограничения проведенного анализа. Прежде всего, исследование имеет аналитико-сравнительный характер: предметом рассмотрения стали сами методы и модели, а не полевые эксперименты по формированию реальных команд. Поэтому сделанные выводы носят методологический и архитектурный характер, а не причинно-экспериментальный. Кроме того, гетерогенность терминологии в различных источниках (например, различное понимание понятий «компетенция», «роль» или «эффективность») усложняет прямое сопоставление. Качество эмпирических данных в ряде случаев ограничено, так как выборки нередко специфичны для отдельных отраслей и компаний. Наконец, ряд моделей по своей природе статичен и не учитывает динамику развития компетенций, что снижает точность выводов на долгосрочных интервалах.

Тем не менее выявленные ограничения открывают перспективы дальнейших исследований. Наиболее перспективным направлением является разработка многокритериальной оптимизации, ориентированной на Waterfall-проекты, с учетом таких факторов, как сроки, стоимость, покрытие ролями, координационная нагрузка и риски замещения специалистов. Перспективным видится развитие динамических моделей компетенций, которые учитывают изменение навыков и эффект передачи знаний. Особое значение имеет интеграция многокритериальных подходов с имитационным моделированием и элементами теории игр, что позволит оценивать устойчивость состава команды при изменении внешних условий и стратегическом поведении участников. Важной задачей является создание открытых эталонных наборов данных для сопоставимых исследований, а также рассмотрение этических аспектов автоматизации подбора команд.

5. Заключение

В статье был проведен анализ существующих моделей и методов формирования команды, которые предлагают различные подходы к распределению ролей и обязанностей, организации работы команды и управлению проектом. Было выявлено, что, несмотря на наличие определенных преимуществ у каждого из рассмотренных методов, их общим существенным недостатком является и ориентация на однокритериальную оптимизацию. Существующие модели, как правило, формируют команду относительно одного, заранее заданного набора значений срока выполнения проекта и его стоимости. Эта особенность вводит ограничения для лиц, принимающих решения относительно выбора между возможными оптимальными составами команды.

Помимо анализа моделей были рассмотрены инструменты, используемые при формировании команды IT-проекта, такие как экспертные оценки, теоретико-игровые модели, системный анализ, однокритериальная и многокритериальная оптимизация и имитационное моделирование. Анализ существующих подходов показывает, что большинство методов применимы как для традиционной каскадной, так и для гибких методологий управления проектами. Однако выявлен пробел в применении многокритериальной оптимизации в Waterfall-проектах. Это ограничение может снижать эффективность подбора команды в традиционных моделях разработки, где критически важно учитывать сразу несколько факторов, таких как сроки, стоимость, компетенции и взаимодействие участников. Таким образом, актуальным является развитие методологической и инструментальной базы многокритериальной оптимизации формирования команд IT-проектов, реализуемых по методологии Waterfall, что позволит повысить обоснованность принимаемых управленческих решений, учесть совокупность ключевых факторов и обеспечить более высокую результативность реализации IT-проектов, реализуемых по данной методологии.

Список литературы

- Afolabi A.I., Chukwurah N. and Abieba O.A. (2025) Implementing cutting-edge software engineering practices for cross-functional team success. *Journal details pending*.
- Ampuero M.A. and Abreu A.L.I. (2021) Developing a model and a tool for the formation of project teams. In: *Latin American women and research contributions to the IT field*. IGI Global Scientific Publishing, pp.240-262.
- Bassil Y. (2012) A simulation model for the waterfall software development life cycle. *arXiv preprint arXiv:1205.6904*.
- Boehm B. and Turner R.N. (2003) *Balancing agility and discipline: a guide for the perplexed*. Addison-Wesley Professional.
- Bukht R. and Heeks R. (2017) Defining, conceptualising and measuring the digital economy. *Development Informatics working paper*, (68).
- Cao L., Ramesh B. and Abdel-Hamid T. (2010) Modeling dynamics in agile software development. *ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)*, 1(1), pp.1-26.
- Chow T. and Cao D.B. (2008) A survey study of critical success factors in agile software projects. *Journal of systems and software*, 81(6), pp.961-971.
- Conforto E.C. et al. (2014) Can agile project management be adopted by industries other than software development? *Project Management Journal*, 45(3), pp.21-34.
- Daniel M. and Odon M. (2021) Development of a tool for team formation in engineering education. *International Journal Of Engineering And Management Research*, 11(6), pp.62-69.
- Deb K. et al. (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), pp.182-197.
- Dehghani M. and Trojovský P. (2021) Teamwork optimization algorithm: a new optimization approach for function minimization/maximization. *Sensors*, 21(13), p.4567.
- Dingsøyr T., Moe N.B. and Seim E.A. (2018) Coordinating knowledge work in multiteam programs: findings from a large-scale agile development program. *Project Management Journal*, 49(6), pp.64-77.
- Driskell T., Salas E. and Driskell J.E. (2018) Teams in extreme environments: alterations in team development and teamwork. *Human resource management review*, 28(4), pp.434-449.
- George B. and Paul J. (2020) *Digital transformation in business and society*. New York, NY, USA : Springer International Publishing.
- Hoda R., Noble J. and Marshall S. (2012) Self-organizing roles on agile software development teams. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 39(3), pp.422-444.
- Luan D. and Xie T. (2024) Agile portfolio management in the software-development sector a qualitative literature study of challenges and opportunities.
- Luan D. and Xie T. (2024) Agile portfolio management in the software-development sector a qualitative literature study of challenges and opportunities.
- Lunesu M.I. et al. (2021) Assessing the risk of software development in agile methodologies using simulation. *IEEE Access*, 9, pp.134240-134258.
- Mahmoudpour F., Gholipour A. and Carmen Galang M. (2025) Enhancing team building in project-oriented organizations: an arts-based approach. *Human Systems Management*, 44(3), pp.424-431.
- Mesarovic M.D. and Takahara Y. (1975) *General systems theory: mathematical foundations*. Academic press.
- Myerson R.B. (2013) *Game theory*. Harvard university press.
- Pinto J.K. and Slevin D.P. (1987) Critical factors in successful project implementation. *IEEE transactions on engineering management*, (1), pp.22-27.
- Poppendieck M. and Poppendieck T. (2003) *Lean software development: an agile toolkit: an agile toolkit*. Addison-Wesley.
- Qu D. et al. (2023) A competition-oriented student team building method. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, pp.1966-1979.
- Raibulet C. and Fontana F.A. (2018) Collaborative and teamwork software development in an undergraduate software engineering course. *Journal of Systems and Software*, 144, pp.409-422.
- Royce W.W. (1987) Managing the development of large software systems: concepts and techniques. *Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering*, pp.328-338.
- Salas E., Reyes D.L. and McDaniel S.H. (2018) The science of teamwork: progress, reflections, and the road ahead. *American Psychologist*, 73(4), p.593.
- Saravanos A. and Curinga M.X. (2023) Simulating the software development lifecycle: the waterfall model. *Applied System Innovation*, 6(6), p.108.
- Serrador P. and Pinto J.K. (2015) Does agile work?—a quantitative analysis of agile project success. *International journal of project management*, 33(5), pp.1040-1051.
- Song I.H.J. and Paczek C. (2023) Work in progress: agile methodologies for online software engineering education under the pandemic. *2023 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*, pp.1-4.
- Sutherland J. and Sutherland J.J. (2014) *Scrum: the art of doing twice the work in half the time*. Crown Currency.
- Vaida M.F. (2019) Collaborative education teams development using alternative methodologies. *Proceedings of the 11th International Conference on Education Technology and Computers*, pp.223-227.
- Vershina E., Zvereva O. and Shabunin S. (2024) Technique for building project teams based on the belbin role model. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, 18, pp.14-27.
- Vidgen R. and Wang X. (2009) Coevolving systems and the organization of agile software development. *Information Systems Research*, 20(3), pp.355-

376.

- White A.S. (2014) An agile project system dynamics simulation model. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach (IJITSA)*, 7(1), pp.55-79.
- Zhang L. and Zhang X. (2013) Multi-objective team formation optimization for new product development. *Computers & Industrial Engineering*, 64(3), pp.804-811.
- Zzkarian A. and Kusiak A. (1999) Forming teams: an analytical approach. *IEE transactions*, 31(1), pp.85-97.
- Ажмухамедов И.М., Ажмухамедов А.И. (2011) Методика формирования команды для реализации IT-проектов на основе нечеткой когнитивной модели оценки компетенций. *Прикладная информатика*, 4(34), pp.70-76.
- Афонин П.А. (2020) Предиктивный метод определения результативности команды IT-проекта. *Электронный экономический вестник Татарстана*, (2), pp.79-85.
- Бейльханов Д.К., Квятковская И.Ю. (2012) Использование методов оценки кандидатов в процессе командообразования. *Поколение будущего: Взгляд молодых ученых - 2012*, 2, pp.156-160.
- Гинцяк А.М. (2023) Моделирование научно-исследовательских проектов с применением инструментов теории игр. *Инновации*, (1(291)), p.66.
- Дергачев М.В., Бекетов С.М. (2024) Алгоритм расчета стоимости проекта с учетом сроков и оптимального состава команды для принятия обоснованных управленческих решений. *Управление инновациями в условиях цифровой трансформации*, pp.54-58.
- Дергачев М.В., Бекетов С.М. (2025) Методы принятия решений в управлении IT-проектами. *Современные подходы в системном инжиниринге и цифровом моделировании сложных производственных систем*, pp.404-410.
- Кузьмина Э.В., Пьянкова Н.Г. (2024) Совершенствование процесса управления проектом разработки программного продукта. *Вестник Академии знаний*, (5(64)), pp.629-635.
- Никитина М.И. et al. (2023) Модель рационального стимулирования членов проектной команды на базе инструментов теории игр. *Прикладная математика и вопросы управления*, (1), pp.72-88.
- Хаджиева С.В. (2018) Разработка моделирующего алгоритма формирования команды IT-проекта. *Информационные технологии в науке, бизнесе и образовании*, pp.133-139.
- Хитрова Т.И., Ованесян С.С. and Низовцева А.С. (2020) Методы формирования состава исполнителя IT-проекта. *Baikal Research Journal*, 11(4), p.7.
- Шушков Ю.Г. (2008) Поддержка процесса формирования команды для разработки внешнего IT проекта. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, (8(46)), pp.124-126.

References

- Afolabi A.I., Chukwurah N. and Abieba O.A. (2025) Implementing cutting-edge software engineering practices for cross-functional team success. *Journal details pending*.
- Afonin P.A. (2020) Prediktivnyy metod opredeleniya rezul'tativnosti komandy IT-proekta. *Elektronnyy ekonomicheskyy vestnik Tatarstana*, (2), pp.79-85. (in Russian)
- Ampuero M.A. and Abreu A.L.I. (2021) Developing a model and a tool for the formation of project teams. In: *Latin American women and research contributions to the IT field*. IGI Global Scientific Publishing, pp.240-262.
- Azhmuhamedov I.M. and Azhmuhamedov A.I. (2011) Metodika formirovaniya komandy dlya realizatsii IT-proektov na osnove nechetkoy kognitivnoy modeli otsenki kompetentsiy. *Prikladnaya informatika*, 4(34), pp.70-76. (in Russian)
- Bassil Y. (2012) A simulation model for the waterfall software development life cycle. *arXiv preprint arXiv:1205.6904*.
- Beilkhanov D.K. and Kvyatkovskaya I.Yu. (2012) Ispol'zovanie metodov otsenki kandidatov v protsesse komandoobrazovaniya. *Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh - 2012*, 2, pp.156-160. (in Russian)
- Boehm B. and Turner R.N. (2003) *Balancing agility and discipline: a guide for the perplexed*. Addison-Wesley Professional.
- Bukht R. and Heeks R. (2017) Defining, conceptualising and measuring the digital economy. *Development Informatics working paper*, (68).
- Cao L., Ramesh B. and Abdel-Hamid T. (2010) Modeling dynamics in agile software development. *ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)*, 1(1), pp.1-26.
- Chow T. and Cao D.B. (2008) A survey study of critical success factors in agile software projects. *Journal of systems and software*, 81(6), pp.961-971.
- Conforto E.C. et al. (2014) Can agile project management be adopted by industries other than software development? *Project Management Journal*, 45(3), pp.21-34.
- Daniel M. and Odon M. (2021) Development of a tool for team formation in engineering education. *International Journal Of Engineering And Management Research*, 11(6), pp.62-69.
- Deb K. et al. (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), pp.182-197.
- Dehghani M. and Trojovský P. (2021) Teamwork optimization algorithm: a new optimization approach for function minimization/maximization. *Sensors*, 21(13), p.4567.
- Dergachev M.V. and Beketov S.M. (2024) Algoritm rascheta stoimosti proekta s uchetom srokov i optimal'nogo sostava komandy dlya prinyatiya obosnovannykh upravlencheskikh resheniy. *Upravlenie innovatsiyami v usloviyakh tsifrovoy transformatsii*, pp.54-58. (in Russian)
- Dergachev M.V. and Beketov S.M. (2025) Metody prinyatiya resheniy v upravlenii IT-proektami. *Sovremennye podkhody v sistemnom inzhiniringe i tsifrovom modelirovanii slozhnykh proizvodstvennykh sistem*, pp.404-410. (in Russian)
- Dingsøyr T., Moe N.B. and Seim E.A. (2018) Coordinating knowledge work in multiteam programs: findings from a large-scale agile development program. *Project Management Journal*, 49(6), pp.64-77.
- Driskell T., Salas E. and Driskell J.E. (2018) Teams in extreme environments: alterations in team development and teamwork. *Human resource management review*, 28(4), pp.434-449.
- George B. and Paul J. (2020) *Digital transformation in business and society*. New York, NY, USA : Springer International Publishing.
- Gintciak A.M. (2023) Modelirovanie nauchno-issledovatel'skikh proektov s primeneniem instrumentov teorii igr. *Innovatsii*, (1(291)), p.66. (in Russian)
- Hoda R., Noble J. and Marshall S. (2012) Self-organizing roles on agile software development teams. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 39(3), pp.422-444.
- Khadzhiyeva S.V. (2018) Razrabotka modeliruyushchego algoritma formirovaniya komandy IT-proekta. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, biznese i obrazovanii*, pp.133-139. (in Russian)
- Khitrova T.I., Ovanesyanyan S.S. and Nizovtseva A.S. (2020) Metody formirovaniya sostava ispolnitele IT-proekta. *Baikal Research Journal*, 11(4), p.7. (in Russian)
- Kuz'mina E.V. and P'yankova N.G. (2024) Sovershenstvovanie protsessu upravleniya proektom razrabotki programmnogo produkta. *Vestnik Akademii znaniy*, (5(64)), pp.629-635. (in Russian)
- Luan D. and Xie T. (2024) Agile portfolio management in the software-development sector a qualitative literature study of challenges and opportunities.
- Lunesu M.I. et al. (2021) Assessing the risk of software development in agile methodologies using simulation. *IEEE Access*, 9, pp.134240-134258.
- Mahmoudpour F., Gholipour A. and Carmen Galang M. (2025) Enhancing team building in project-oriented organizations: an arts-based approach. *Human Systems Management*, 44(3), pp.424-431.
- Mesarovic M.D. and Takahara Y. (1975) *General systems theory: mathematical foundations*. Academic press.
- Myerson R.B. (2013) *Game theory*. Harvard university press.

- Nikitina M.I. et al. (2023) Model' ratsional'nogo stimulirovaniya chlenov proektnoy komandy na baze instrumentov teorii igr. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya*, (1), pp.72-88. (in Russian)
- Pinto J.K. and Slevin D.P. (1987) Critical factors in successful project implementation. *IEEE transactions on engineering management*, (1), pp.22-27.
- Poppendieck M. and Poppendieck T. (2003) *Lean software development: an agile toolkit: an agile toolkit*. Addison-Wesley.
- Qu D. et al. (2023) A competition-oriented student team building method. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, pp.1966-1979.
- Raibulet C. and Fontana F.A. (2018) Collaborative and teamwork software development in an undergraduate software engineering course. *Journal of Systems and Software*, 144, pp.409-422.
- Royce W.W. (1987) Managing the development of large software systems: concepts and techniques. *Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering*, pp.328-338.
- Salas E., Reyes D.L. and McDaniel S.H. (2018) The science of teamwork: progress, reflections, and the road ahead. *American Psychologist*, 73(4), p.593.
- Saravanos A. and Curinga M.X. (2023) Simulating the software development lifecycle: the waterfall model. *Applied System Innovation*, 6(6), p.108.
- Serrador P. and Pinto J.K. (2015) Does agile work?—a quantitative analysis of agile project success. *International journal of project management*, 33(5), pp.1040-1051.
- Shushkov Yu.G. (2008) Podderzhka protsessy formirovaniya komandy dlya razrabotki vneshnego IT proekta. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (8(46)), pp.124-126. (in Russian)
- Song I.H.J. and Paczek C. (2023) Work in progress: agile methodologies for online software engineering education under the pandemic. *2023 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*, pp.1-4.
- Sutherland J. and Sutherland J.J. (2014) *Scrum: the art of doing twice the work in half the time*. Crown Currency.
- Vaida M.F. (2019) Collaborative education teams development using alternative methodologies. *Proceedings of the 11th International Conference on Education Technology and Computers*, pp.223-227.
- Vershinina E., Zvereva O. and Shabunin S. (2024) Technique for building project teams based on the belbin role model. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, 18, pp.14-27.
- Vidgen R. and Wang X. (2009) Coevolving systems and the organization of agile software development. *Information Systems Research*, 20(3), pp.355-376.
- White A.S. (2014) An agile project system dynamics simulation model. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach (IJITSA)*, 7(1), pp.55-79.
- Zhang L. and Zhang X. (2013) Multi-objective team formation optimization for new product development. *Computers & Industrial Engineering*, 64(3), pp.804-811.
- Zzkarian A. and Kusiak A. (1999) Forming teams: an analytical approach. *IIE transactions*, 31(1), pp.85-97.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025, одобрена после рецензирования 25.05.2025, принята к публикации 09.06.2025.

The article was submitted 15.05.2025, approved after reviewing 25.05.2025, accepted for publication 09.06.2025.

Информация об авторах:

1. Максим Дергачев, лаборант-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0004-4030-7258>, maksim.dergachev@spbpu.com
2. Сальбек Бекетов, ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, salbek.beketov@spbpu.com
3. Алексей Гинцяк, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, aleksei.gintciak@spbpu.com

About authors:

1. Maksim Dergachev, Research Assistant, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0004-4030-7258>, maksim.dergachev@spbpu.com
2. Salbek Beketov, Assistant, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, salbek.beketov@spbpu.com
3. Alexey Gintciak, PhD, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, aleksei.gintciak@spbpu.com

Научная статья

УДК 656.7

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.2>

АНАЛИЗ РЫНОЧНЫХ РИСКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА В АВИАКОМПАНИИ

Екатерина Терешко*, Анастасия Северюхина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ektereshko@mail.ru, a.severiukhina@yandex.ru

*Автор, ответственный за переписку: ektereshko@mail.ru

Аннотация

Данная статья посвящена анализу рыночных рисков для разработки эффективной системы риск-менеджмента в авиакомпании (АК) для повышения ее устойчивости к кризисным ситуациям, а также минимизации воздействия рисков на ее деятельность. Исследование основывается на гипотезе о том, что эффективность внедрения системы риск-менеджмента в АК напрямую зависит от качества анализа ключевых производственных процессов. Целью исследования является анализ рыночных рисков в рамках разработки эффективной системы риск-менеджмента в АК для повышения ее устойчивости к кризисным ситуациям, а также минимизации воздействия рисков на ее деятельность. Методологической базой исследования выступили качественные и количественные методы, которые предполагают: 1) построение базового производственного процесса АК; 2) формирование реестра рисков АК; 3) построение тепловой карты рисков АК; 4) формирование онтологической схемы реестра заинтересованных сторон для управления рыночными рисками в АК. В результате исследования выявлены ключевые аспекты для развития риск-менеджмента в АК. Интеграция систем риск-менеджмента с системами управлением качеством и безопасностью, а также цифровизация помогут повысить качество анализа рисков, улучшить процессы принятия решений в АК, а также адаптироваться к новым требованиям рынка.

Ключевые слова: риск-менеджмент, пассажирские перевозки, авиакомпании, производственный процесс, реестр рисков, реестр заинтересованных сторон

Цитирование: Терешко, Е., Северюхина, А., 2025. Анализ Рыночных Рисков при Разработке Системы Риск-Менеджмента в Авиакомпании. Sustainable Development and Engineering Economics 2, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.2>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Терешко Е., Северюхина А., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.2>

ANALYSIS OF MARKET RISKS IN THE DEVELOPMENT OF AN AIRLINE'S RISK MANAGEMENT SYSTEM

Ekaterina Tereshko*, Anastasia Severyukhina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, ektereshko@mail.ru, a.severiukhina@yandex.ru

*Corresponding author: ektereshko@mail.ru

Abstract

This article is devoted to the analysis of market risks for the development of an effective risk management system in an airline to increase its resilience to crisis situations, as well as minimize the impact of risks on its operations. The study is based on the hypothesis that the effectiveness of implementing a risk management system in the airline directly depends on the quality of the analysis of key production processes. The purpose of the study is to analyze market risks as part of the development of an effective risk management system in the air company to increase its resilience to crisis situations, as well as minimize the impact of risks on its activities. The methodological basis of the study was qualitative and quantitative methods, which assume: 1) construction of the airline's basic production process; 2) formation of the airline's risk register; 3) construction of the airline's risk heat map; 4) formation of an ontological scheme of the stakeholders register for risk management. As a result of the research, key aspects for the development of risk management in airlines have been identified. The integration of risk management systems with quality and safety management systems, digitalization will help to improve the quality of risk analysis, improve decision-making processes in airlines, and adapt to new market requirements.

Keywords: risk management, passenger transportation, airlines, production process, risk register, register of stakeholders.

Citation: Tereshko, E., Severyukhina, A., 2025. Analysis of Market Risks in the Development of an Airline's Risk Management System. Sustainable Development and Engineering Economics 2, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.2>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Tereshko, E., Severyukhina, A., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

В современных условиях глобализации и стремительного развития авиационной отрасли управление рисками становится одной из ключевых задач для авиакомпаний (далее АК) (Palamarchuk and Liberman, 2022; Gorbatenko, 2013). Внедрение системы риск-менеджмента не только способствует повышению безопасности полетов, но и обеспечивает устойчивость бизнеса в условиях неопределенности. Авиаперевозчики сталкиваются с множеством угроз – от технических неисправностей и человеческого фактора до экономических колебаний и природных катастроф (Karyakin et al., 2023; Burdina et al., 2021). Эффективная система риск-менеджмента позволяет не только минимизировать потенциальные потери, но и оптимизировать операционные процессы, улучшая качество обслуживания пассажиров. В связи с чем тема исследования является достаточно актуальной.

На территории Российской Федерации функционирует множество АК, как крупных, так и малых, которые обеспечивают внутренние и международные перевозки. К числу крупнейших авиаперевозчиков относятся такие, как группа компаний «Аэрофлот» (входят сетевые АК «Аэрофлот» и «Россия», лоукостер «Победа»), «S7 Airlines», «Уральские авиалинии» и «UTair»¹. Данные АК играют важную роль в развитии гражданской авиации, не только обеспечивая регулярные рейсы, но и внедряя современные технологии и стандарты безопасности.

По состоянию на начало 2025 года в России зарегистрировано 120 АК², из которых около 40 активно осуществляют регулярные пассажирские перевозки по внутренним рейсам. Общий объем перевезенных пассажиров в конце 2024 года составил 111,3 млн чел. (из которого 27,3 млн чел. – международные перевозки (далее *м.п.*), 84 млн чел. – внутренние перевозки (далее *в.п.*)), а в 2023 году составил 105,4 млн чел. (из которого 22,4 млн чел. – м.п., 83 млн чел. – в.п.), при этом процент занятости пассажирских кресел составил 87,6% (где 85,5% – м.п., 88,6% – в.п.), следовательно, общий объем перевезенных пассажиров за год увеличился на 5,6%³.

Стоит отметить, что АК необходимо уметь адаптироваться к кризисным ситуациям, так как это является ключевым фактором выживания и успеха в условиях нестабильности. Важно: 1) сохранить финансовую устойчивость (в целях минимизации убытков и сохранения ликвидности); 2) поддерживать конкурентоспособность (уметь адаптироваться к новым условиям с удержанием позиций или быстрым их восстановлением); 3) совершенствовать клиентский опыт (быть гибкими и внедрять новые технологии); 4) внедрять инновации с целью устойчивого развития (разрабатывать собственные стратегии, базируясь на устойчивых практиках рыночных компаний, как федеральных, так и международных).

Рассматривая кризис, который начался в 2020 году (с началом пандемии COVID-19), отметим, что произошло значительное снижение производственных показателей в пассажирских авиаперевозках (Polzikova and Yurchenko, 2020; Matyukha, 2022; Pekhtereva, 2021). Например, в 2019 году суммарный объем перевезенных пассажиров составил 128,1 млн чел. (из которого 55,1 млн чел. – м.п., 73,7 млн чел. – в.п.), а в 2020 году суммарный объем перевезенных

¹ Пассажирские авиаперевозки в России. 31.01.2025. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 25.01.2025).

² Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация). Статистические данные. [Электронный ресурс]. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-vozdushnye-perevozki-stat-dannie/> (дата обращения: 28.01.2025).

³ Пассажирские авиаперевозки в России. 31.01.2025. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 25.01.2025); Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация). Статистические данные. [Электронный ресурс]. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-vozdushnye-perevozki-stat-dannie/> (дата обращения: 28.01.2025).

пассажиров составил 69,2 млн чел. (из которого 13,1 млн чел. – м.п., 56,2 млн чел. – в.п.)⁴, следовательно, общий объем перевезенных пассажиров за год уменьшился на 85%, а международные перевозки сократились более чем в четыре раза. Согласно данным группы компаний РосБизнесКонсалтинг (РБК) по итогам 2020 года, суммарный убыток 15 крупнейших российских АК составил почти 125 млрд руб.⁵, наибольшие финансовые потери понесли группа компаний «Аэрофлот», а также «Уральские авиалинии» и «S7 Airlines» (Matyukha, 2022). Это побудило АК изменить свои бизнес-модели. Например, в работах (Fokeev, 2022a; Fokeev, 2022b) проанализированы действия российских АК в 2020-м и первой половине 2021 года, рассмотрена применимость отраслевых моделей и стратегий кризисного реагирования. Учитывая региональные особенности, автор выделяет типы реакций и элементы изменений бизнес-моделей отечественных авиаперевозчиков. В работах также отмечено, что действия российских АК и зарубежных перевозчиков различались из-за особенностей российского рынка. В тот период на российском рынке наметился переход к прямым региональным перелетам, расширению клиентского пути и увеличению конкуренции на основе набора доступных услуг (Fokeev, 2022b). Также выявлены особенности российского рынка: расширение ценностного предложения, нераскрытый потенциал внутренних перевозок и возможность кооперации АК и провайдеров услуг (Fokeev, 2022a).

Распространение COVID-19 сильно отразилось и на деятельности международного рынка авиаперевозок. Изоляция стран, регионов, остановка авиаперелетов привели к падению спроса и предложения на авиаперевозки, снижению макроэкономических показателей и дестабилизации мировой финансовой системы.

Новый политический и экономический кризис 2022 года, вызванный специальной военной операцией (СВО) и последующими санкциями, также оказал значительное влияние на российских авиаперевозчиков, выявив список ключевых проблем и рисков. Одной из основных проблем стало закрытие воздушного пространства для российских АК рядом стран, что привело к резкому сокращению международных рейсов. Введение режима временного ограничения полетов в 11 российских аэропортах привело к снижению пассажиропотока, сокращению количества международных рейсов и падению доходов АК. Это ограничение вынудило перевозчиков пересмотреть свои маршруты и сократить количество направлений, что негативно сказалось на доходах и пассажиропотоке. В 2022 году суммарный объем перевезенных пассажиров составил 95,2 млн чел. (из которого 17,5 млн чел. – м.п., 77,7 млн чел. – в.п.), а годом ранее, в 2021-м, суммарный объем перевезенных пассажиров составлял 111,1 млн чел. (из которого 23,5 млн чел. – м.п., 87,5 млн чел. – в.п.)⁶. Кроме того, введенные санкции затруднили доступ к зарубежным запчастям и техническому обслуживанию самолетов (Borkova et al., 2022; Nazarova and Nazarova, 2022), что создало дополнительные риски для безопасности полетов и увеличило затраты на эксплуатацию воздушного флота. Российские АК столкнулись с дефицитом современных самолетов, так как многие зарубежные производители приостановили поставки, а также с проблемами в обслуживании существующих моделей (Stadnik, 2012).

⁴ Там же.

⁵ Коренько А. Убыток российских авиаперевозчиков в 2020-м достиг почти 125 млрд руб. РБК–021–14.04. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/finances/14/04/2021/607406a69a7947fb223bd328> (дата обращения: 01.02. 2025).

⁶ Пассажирыские авиаперевозки в России. 31.01.2025. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 25.01.2025); Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация). Статистические данные. [Электронный ресурс]. URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-vozdushnye-perevozki-stat-dannie/> (дата обращения: 28.01. 2025).

В результате рассмотренных факторов российский авиарынок столкнулся с необходимостью адаптации к новым условиям, что привело к увеличению конкуренции среди внутренних перевозчиков, а также к переходу на новые маршруты и форматы обслуживания. Однако долгосрочные последствия остаются неопределенными, и восстановление международных связей может занять значительное время, в связи с чем внедрение системы риск-менеджмента в АК представляется достаточно актуальной темой для рассмотрения в текущих рыночных условиях.

Согласно данным распоряжения Правительства РФ от 25 июня 2022 года, 67,1% парка пассажирских воздушных судов в России составляли иностранные воздушные суда, около 700 самолетов были получены в лизинг от иностранных компаний⁷. После введения санкций существовала угроза остановки полетов на магистральных линиях, но благодаря эффективным решениям Правительства и Министерства транспорта АК смогли в короткие сроки получить сертификаты летной годности и зарегистрировать суда в Российском реестре. Для нивелирования действия санкций российские власти также ввели дополнительные меры государственной поддержки АК, в том числе предоставление субсидий на техническое обслуживание самолетов (Nikolishvili, 2022; Mikhalev, 2024).

Международные авиаперевозчики, работающие на территории России, также оказались в сложной ситуации. Многие из них приостановили свои рейсы в ответ на санкции и ограничения, что привело к потере доступа к важным рынкам и снижению конкурентоспособности. Некоторые компании были вынуждены закрыть свои представительства в России или сократить штат сотрудников.

В настоящий момент допуск к международным перевозкам пассажиров имеет семь АК⁸. В последние годы наблюдается рост интереса к малым и региональным авиаперевозчикам (Iurovskikh and Slukina, 2022; Knyazhskiy et al., 2019), что также требует внедрения эффективных систем управления рисками для обеспечения их конкурентоспособности. Данная тенденция вызвана сменяющимися друг друга кризисными ситуациями.

Таким образом, для обеспечения безопасности и достижения стратегических целей АК важно заниматься совершенствованием системы управления рисками. Это включает в себя анализ не только тенденций на авиационном рынке, но и потенциальных рисков, связанных с безопасностью полетов, обслуживанием клиентов, соблюдением нормативных требований, изменениями в экономической, политической, технологической и других средах. Применение современных технологий в области анализа данных и прогнозирования помогает принимать обоснованные решения для реализации стратегических целей, в том числе повышения конкурентоспособности на рынке. Риск-менеджмент позволяет выявлять и оценивать риски, а также разрабатывать мероприятия по минимизации влияния потенциальных угроз на деятельность компании. Создание системы комплексного управления рисками поможет АК поддерживать финансово-хозяйственную деятельность на приемлемом уровне, защищать компанию от потенциальных угроз и создавать условия для устойчивого развития (Mendes et al., 2022; Sharov et al., 2021).

⁷ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25.06.2022 г. № 1693-р «Об утверждении Комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года».

⁸ Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация). Реестр авиакомпаний, занимающихся коммерческими воздушными перевозками. [Электронный ресурс]. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-aviakompanii-reestr-kommercheskie-perevozki/> (дата обращения: 28.01.2025).

В связи с чем в рамках данного исследования выдвигается следующая гипотеза – *эффективность внедрения системы риск-менеджмента зависит от качества анализа ключевых производственных процессов АК*. Предполагается, что чем детальнее и точнее проведен анализ производственных процессов, тем легче идентифицировать уязвимости и потенциальные риски, что в последующем может привести к более эффективному управлению рисками.

Целью исследования является анализ рыночных рисков для разработки эффективной системы риск-менеджмента в АК для повышения ее устойчивости к кризисным ситуациям, а также для минимизации воздействия рисков на ее деятельность. В соответствии с целью исследования необходимо решить следующие *задачи*: 1) построить базовый производственный процесс АК; 2) проанализировать риски, оказывающие влияние на деятельность АК и сформировать реестр рисков; 3) сформировать реестр заинтересованных сторон при работе с риском, оказывающим наибольшее влияние на деятельность АК, и построить онтологическую схему.

Предметом исследования выступает система риск-менеджмента в АК. *Объектом* исследования является АК как организация, осуществляющая воздушные перевозки пассажиров.

2. Обзор литературы

Любой бизнес в своем развитии постоянно сталкивается с рисками, и перевозчики в области гражданской авиации не являются исключением. Именно поэтому при стратегическом планировании необходимо уметь предвидеть возможные риски и предпринимать правильные действия для того, чтобы минимизировать потери от столкновения с проблемами в будущем. Комплекс мер, направленных на то, чтобы защитить от них бизнес, называется риск-менеджментом или управлением рисками (Fomichev, 2020). Например, внедрение системы риск-менеджмента рассматривается на промышленных предприятиях (Kuznetsova, 2019), в том числе в строительной отрасли (Pishchalkina et al., 2021), в здравоохранении (Gertsik, 2016) и образовании (Opfer, 2015), а также в других отраслях. Важно отметить, что успешная реализация риск-менеджмента позволяет не только снизить вероятность негативных последствий, но и создать более устойчивую и адаптивную организацию, способную эффективно реагировать на изменения внешней среды и внутренние вызовы (Medvedeva, 2020).

Можно утверждать, что для современного бизнеса риск в глобальном смысле представляет собой потенциально существующую вероятность потери ресурсов или неполучения доходов в результате воздействия внешних или внутренних факторов. Риски и степень их влияния на дальнейшую деятельность компании напрямую зависят от эффективности управления и обоснованности принятых управленческих решений, и, поскольку нельзя полностью обезопасить свое дело от рисков, компании нанимают или обучают риск-менеджеров, которые с помощью аналитики и прогнозирования выявляют риски, их возможные негативные или положительные эффекты, а также предлагают способы управления, чтобы добиваться наиболее высоких результатов на рынке.

Существует множество подходов к классификации рисков, в основном они разделяются на следующие группы (Fomichev, 2020):

1. По уровню допустимости – допустимые, критические и катастрофические риски, эта классификация связана с объемом экономических потерь в результате того или иного шага, и

угроза варьируется от целесообразной потери, которая будет перекрыта потенциальной прибылью, до возможного банкротства.

2. По степени правомерности – оправданные или неоправданные риски, исчисляемые в процентах. Нужно учитывать, что в различных сферах степень оправданности (правомерности) рисков различается, например, в области атомной энергетики они вообще не допускаются, а в сфере теоретических научных исследований допустимая вероятность получения отрицательного результата находится на уровне 5–10%.

3. По возможности страхования – страхуемые и нестрахуемые риски. Если предприниматель перекладывает ответственность за риск на другой субъект экономики, обычно на страховую компанию, банк или подрядчиков, такой риск является страхуемым, и традиционно к ним относят независимые от предпринимателя случаи – стихийные бедствия, транспортные аварии, ошибки сотрудников или субподрядчиков, болезни или смерть и прочие события.

В гражданской авиации следует разделять риски, которые относятся непосредственно к безопасности полетов (транспортной безопасности, отсутствию угроз на борту и при подготовке рейса, производственной безопасности сотрудников), и риски, с которыми сталкивается АК как бизнес – далее мы будем говорить именно о том, что может грозить компании с экономической, экологической, политической и прочих точек зрения (Paristova and Khayrullin, 2012; Voronin and Samsonov, 2014). Исходя из этого, можно сформировать специфику рисков, с которыми, в отличие от некоторых прочих видов предпринимательской деятельности, сталкиваются АК.

С 2015 года в крупнейшей российской АК ПАО «Аэрофлот» функционирует департамент управления рисками (Afzalov et al., 2024). Деятельность подразделения регулируется Положением о системе управления рисками Группы компаний «Аэрофлот». В целях повышения эффективности управления рисками в АК ежегодно формируется отчет, включающий анализ рисков и анализ эффективности функционирования корпоративной системы управления рисками. Департамент ведет деятельность по управлению рисками в области безопасности полетов и охраны труда, авиационной и информационной безопасности, коррупционными рисками и рисками мошенничества, экологическими рисками. Согласно отчету ПАО «Аэрофлот»⁹, практически половина всех рисков АК носит организационный характер, следовательно, такие риски являются управляемыми и нивелируются грамотным подходом к планированию. Второе место занимают технико-производственные риски, которые труднее контролировать из-за большого количества сложной техники и оборудования, используемого в полетной деятельности и ее обеспечении. На третьем месте находятся рыночные риски, связанные с ценами на топливо, рыночными ставками, валютными курсами. Четвертое место занимают природные риски, сложно предсказуемые и слабо поддающиеся контролю со стороны руководства АК. Завершают список кредитные, юридические и политические риски, их проще всего избежать с помощью правильных действий специалистов в данных областях (Stadnik, 2012; Lieberman and Yastrebov, 2020; Taluyev, 2010).

В еще одной крупной российской АК «S7 Airlines» управлением рисками занимается Служба качества и рисков. Основными задачами подразделения являются стандартизация систем управления качеством и интеграция их в бизнес-процессы компании. В «S7 Airlines»

⁹ Годовые отчеты ПАО «Аэрофлот». [Электронный ресурс]. URL: <https://ir.aeroflot.ru/ru/reporting/annual-reports/> (дата обращения: 05.02.2025).

выделяют четыре группы рисков¹⁰. К первой группе относят операционные риски, связанные с безопасностью полетов, охраной труда, а также информационной и экономической безопасностью (Portnyagin and Romantsev, 2020). Следующая группа – финансовые риски – включает в себя риски, связанные с финансовой деятельностью компании (Zhakov and Alieva, 2021). Группа комплаенс-рисков включает правовые, регуляторные, а также налоговые и коррупционные риски. И к четвертой группе относят бизнес-риски: стратегические, отраслевые риски, риски эпидемий, катастроф, стихийных бедствий, а также экологические и репутационные риски (Kubichek and Kislenok, 2013), риски качества.

В то же время в мировой практике активно развиваются процессы стандартизации и управления рисками (Price and Forrest, 2024). С 2006 года управление безопасностью полетов регулируется Руководством ICAO (International Civil Aviation Organization). Согласно этому документу, система управления рисками является частью системы управления безопасностью полетов (СУБП). Требования к СУБП описаны в Чикагской конвенции, в статье 24 Воздушного кодекса РФ, в Федеральных авиационных правилах и в Постановлении Правительства РФ от 18 ноября 2014 года № 1215 «О порядке разработки и применения систем управления безопасностью полетов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полетов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими» (Fomkin and Popova, 2019).

Для обеспечения эффективной работы системы менеджмента рисков разработаны правила государственного стандарта (ГОСТ) и Рекомендации по стандартизации. Нормативные документы¹¹ устанавливают основные принципы и области применения риск-менеджмента, рекомендации по выявлению причин, его повлекших, общее описание системы или процесса. Стандарты¹² устанавливают принципы разработки, ведения, оценки реестра риска для повышения объективности принятия решений в области риск-менеджмента. Рекомендации по стандартизации¹³ помогают проводить мониторинг и прогнозирование опасных событий, используя индикаторы рисков.

Для того чтобы АК могли точнее спрогнозировать возможные риски, им необходимо заниматься мониторингом ситуаций на отраслевом рынке и постоянно совершенствовать систему риск-менеджмента. Развитие цифровых технологий позволяет получить большой объем данных о деятельности компании. Для разработки новых стратегий и обеспечения информационной безопасности в авиационной отрасли все чаще привлекают внимание специалистов в области обработки и анализа больших данных. Применение информационных технологий и искусственного интеллекта в решении задач управления рисками позволяет улучшить результаты прогнозирования потенциальных рисков. Использование аналитических платформ позволяет выявлять тенденции на рынке авиационной отрасли. Кроме того, современные методы идентификации и контроля доступа позволяют повысить уровень

¹⁰ Годовые отчеты S7 Airlines. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.s7.ru/ru/about/sustainability/> (дата обращения: 05.02.2025).

¹¹ ГОСТ Р ИСО 31000–2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»; Р 50.1.068–2009 «Менеджмент риска. Рекомендации по внедрению. Часть 1: Определение области применения»; ГОСТ Р 51901.21–2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Общие положения».

¹² ГОСТ Р 51901.23–2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по оценке риска опасных событий для включения в реестр риска»; ГОСТ Р 51901.22–2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения»; Р 50.1.084–2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по созданию реестра риска организации»; ГОСТ Р ИСО/МЭК 30010–2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска».

¹³ Р 50.1.090–2014 «Менеджмент риска. Ключевые индикаторы риска».

безопасности данных и обеспечить надежность выполнения операций (Paristova and Khayrullin, 2012; Galiyeva, 2024).

Таким образом, исследование эффективности внедрения системы риск-менеджмента является актуальной задачей в условиях современной нестабильной экономической и геополитической обстановки. Формирование службы качества и управления рисками в АК, соблюдение стандартов и правил позволяют своевременно проводить подготовку к возможным опасным ситуациям. Это подтверждает актуальность гипотезы данного исследования о том, что эффективность работы системы риск-менеджмента в АК зависит от своевременного проведения и качества анализа производственных процессов.

3. Материалы и методы

Методология исследования основывается на сочетании качественных и количественных методов. В первую очередь формируется реестр рисков, в котором определяются вероятность их возникновения и степень влияния. Затем проводится ранжирование рисков для выявления наиболее значимого, после чего осуществляется его количественная оценка (Pishchalkina et al., 2021). Данный алгоритм оценки, включающий три ключевых этапа (формирование реестра рисков; ранжирование для определения наиболее вероятного риска; количественная оценка значимых рисков), позволяет более точно анализировать потенциальные угрозы и принимать обоснованные решения. Кроме того, важным аспектом является анализ рисков в авиаперевозках, где выделяются три основные группы: отраслевые, страновые/региональные и правовые (Karyakin et al., 2023). В этом контексте выбор методов оценки рисков зависит от конкретных целей и задач, что подчеркивает гибкость подхода к управлению рисками. Актуальность оценки рисков также подтверждается исследованиями, посвященными развитию стандартов управления рисками в корпоративном секторе российской экономики (Karelina, 2019). Данные исследования помогают сформировать систему анализа риск-менеджмента в компаниях, что является необходимым условием для эффективного управления рисками в современных условиях.

Так как внедрение системы риск-менеджмента в АК требует комплексного подхода к идентификации, оценке и управлению рисками, для достижения этой цели будет применена методология, которая учитывает качественные методы, которые поэтапно предполагают:

Этап 1. Проведение анализа ключевых производственных процессов деятельности АК – идентификация процессов и оценка уязвимости.

Этап 2. Формирование реестра рисков – их идентификация и классификация. Для проведения качественного анализа рисков определены следующие критерии: оценка вероятности возникновения риска и степень влияния риска на деятельность АК.

Этап 2.1. Оценка вероятности возникновения риска. В табл. 1 приведены уровни вероятности возникновения рисков от очень низкой до очень высокой и их описание. Каждому уровню присваивается балльная оценка от 1 до 5 соответственно.

Таблица 1. Критерии оценки вероятности возникновения рисков

Качественная оценка	Оценка в баллах	Интерпретация для событий возникновения риска	Интерпретация с точки зрения исторических данных	Интервалы вероятности возникновения риска
Очень высокая	5	Событие почти точно произойдет и может повториться несколько раз	Несколько случаев реализации риска за год на предприятии, входящем в группу компаний	>80%
Высокая	4	Событие скорее всего произойдет, чем не произойдет	Несколько случаев реализации риска за год на предприятии, входящем в группу компаний	50–80%
Средняя	3	Событие может произойти	Был случай реализации риска за год на предприятии, входящем в группу компаний	20–50%
Низкая	2	Событие скорее всего не произойдет	Подобные случаи имели место быть в истории предприятия, входящем в группу компаний	5–20%
Очень низкая	1	Крайне маловероятно, что событие произойдет	Подобные случаи регистрировались в отрасли	<5%

Источник: составлено авторами

Этап 2.2. Оценка степени влияния рисков. В табл. 2 приведены уровни оценки риска по степени влияния от очень слабого до очень сильного. Аналогично предыдущему критерию каждому уровню соответствует оценка в баллах от 1 до 5 соответственно.

Таблица 2. Критерии оценки степени влияния рисков

Степень влияния	Оценка в баллах	Описание
Очень сильное	5	Очень большое влияние на общую функциональность и очень крупные временные и/или финансовые потери
Сильное	4	Существенное влияние на общую функциональность и крупные временные и/или финансовые потери
Умеренное	3	Некоторое влияние в ключевых областях функциональности, умеренные потери

Степень влияния	Оценка в баллах	Описание
Слабое	2	Небольшое влияние на общую функциональность или влияние на вторичные функции, потери незначительны
Очень слабое	1	Изменения функциональности отсутствуют или практически отсутствуют

Источник: составлено авторами

Этап 3. Построение тепловой карты рисков – визуализация данных с целью оценки вероятности и воздействия.

Этап 4. Формирование онтологической схемы, которая включает в себя участников процесса управления рисками (подразделения АК), риски, а также отношения («включает», «управляет», «решает», «направлено»).

4. Результаты

В условиях постоянно меняющегося рынка авиационных перевозок и возрастающей конкуренции АК сталкиваются с необходимостью не только оптимизации своих операций, но и минимизации рисков, которые могут негативно сказаться на их деятельности. Внедрение системы риск-менеджмента становится ключевым элементом стратегического управления, позволяющим предвидеть, оценивать и управлять потенциальными угрозами. Однако для того, чтобы эффективно реализовать такие системы, необходимо построить четкий и структурированный производственный процесс. Рассмотрим детально дефиницию «производственный процесс» на основе анализа нормативных источников и научной литературы. Анализируя нормативную документацию, можно выделить несколько определений: 1) «совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции» ГОСТ 14.004–83¹⁴; 2) «совокупность действий и производственных отношений людей во взаимосвязи с орудиями труда, что необходимо на данном производственном объекте для изготовления и ремонта продукции (изделия)» ГОСТ Р 113.00.12–2023¹⁵, которые раскрывают сущность производственного процесса кратко, без деталей. Исходя из анализа научной литературы можно отметить определение О.С. Муфтаховой «совокупность постадийных взаимосвязанных основных, вспомогательных и обслуживающих процессов использования трудовых, материальных, страховых и финансовых ресурсов в единицу времени на единицу сырья, материалов, полуфабрикатов с целью выпуска в установленные сроки необходимого количества продукции требуемого качества при минимизации издержек...» (Muftakhova, 2015). Данное определение достаточно комплексно раскрывает сущность дефиниции, что подтверждает связь с риск-менеджментом в контексте настоящего исследования.

В данном исследовании будет рассмотрен «базовый производственный процесс», который представляет собой фундаментальную цепочку операций, необходимых для создания

¹⁴ ГОСТ 14.004-83. Межгосударственный стандарт. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий.

¹⁵ ГОСТ Р 113.00.12-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Наилучшие доступные технологии. Термины и определения.

продукта или услуги, включая ключевые этапы, такие как проектирование, производство и распределение. В отличие от обычного производственного процесса, который может включать дополнительные вспомогательные операции и вариации в зависимости от конкретных условий или требований рынка, базовый процесс фокусируется на минимально необходимом наборе действий для достижения конечного результата. Это позволяет более эффективно анализировать и оптимизировать основные этапы производства без учета внешних факторов и дополнительных процессов (Tuturov and Nayshev, 2006). Базовый производственный процесс в АК включает в себя все основные операции – от управления парком воздушных судов (ВС) и формирования маршрутной сети (МС) до выполнения рейсов и анализа результатов. Он служит основой для выявления возможных рисков на каждом этапе операционной деятельности. Без четкого понимания этих процессов сложно определить, какие именно риски могут возникнуть, как они могут повлиять на общую эффективность и безопасность АК, а также какие меры следует предпринять для их минимизации.

Смоделируем базовый производственный процесс АК, включающий: 1) обеспечение парка ВС; 2) формирование МС; 3) создание предварительного расписания полетов; 4) выполнение полетов; 5) анализ и отчетность АК. Можно выделить четыре ключевых этапа в соответствии с процессами 1–4, сквозным процессом выступает процесс 5 (рис. 1). Ключевые процессы выделены на верхнем уровне из-за их критической важности для успешного функционирования АК (были определены на основе анализа годовых отчетов АК, научной литературы (Stepanenko et al., 2020; Skorba and Sharabayeva, 2020), учебной литературы¹⁶, а также рекомендаций международного стандарта IOSA¹⁷). Каждый из этих процессов требует координации между различными департаментами и подразделениями – от стратегического планирования до операционного исполнения. Задействованные департаменты и подразделения: департамент экономики, бухгалтерия, коммерческая дирекция, департамент производства полетов, департамент технической дирекции, департамент наземного обеспечения перевозок, департамент подготовки авиационного персонала, департамент управления авиационной и транспортной безопасностью, департамент сервиса и маркетинга, департамент информационных технологий и информационной безопасности, департамент по корпоративному управлению и закупочной деятельности (перечень департаментов и подразделений был определен на основе анализа схем организационных структур АК ПАО «Аэрофлот»¹⁸, АО «Uzbekistan Airways»¹⁹). Эффективное взаимодействие между этими подразделениями позволяет АК адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и обеспечивать конкурентоспособность.

¹⁶ Копейкина С.В. Управление производством на воздушном транспорте: курс лекций. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013.

¹⁷ IOSA Standards Manual. [Электронный ресурс]. URL:

https://www.iata.org/contentassets/8658ac253f6848a79480a6da70c85d5f/iosa_standards_manualism_edition_12.pdf (дата обращения: 01.02.2025).

¹⁸ Организационная структура ПАО «Аэрофлот». [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.aeroflot.ru/media/aflfiles/media/about/structure/structure-ru.jpg?2024> (дата обращения: 30.01.2025).

¹⁹ Организационная структура АО «Uzbekistan Airways». [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3GbVR7> (дата обращения: 30.01.2025).

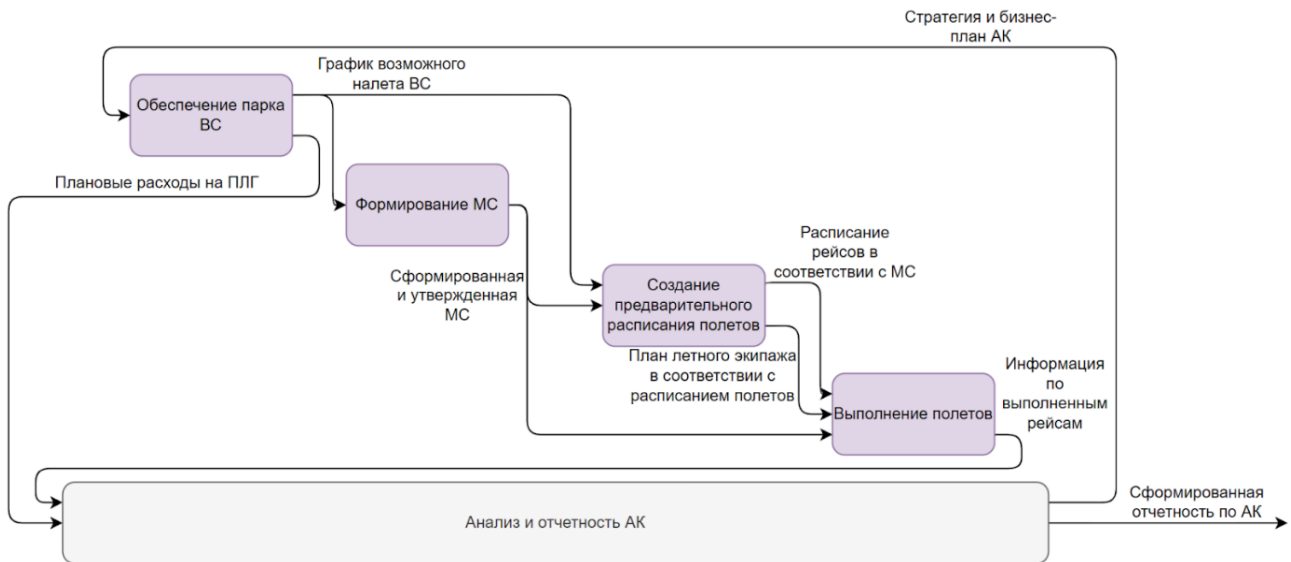


Рисунок 1. Базовый производственный процесс АК

Источник: составлено авторами

В соответствии со схемой базового производственного процесса (рис. 1) рассмотрим детально каждый этап.

На первом этапе (обеспечение парка ВС) стратегия и бизнес-план АК формируют основу для всех последующих процессов. Это включает оценку потребностей в ВС, анализ рынка и конкуренции, а также финансовые расчеты. На выходе с этапа создается график возможного налета ВС и плановые расходы АК, которые являются критически важными для дальнейшего планирования. Данный процесс подразумевает участие таких департаментов и подразделений АК, как департамент экономики, бухгалтерия, коммерческая дирекция, департамент производства полетов, департамент технической дирекции. Деятельность АК на данном этапе сопровождается такими узкими местами, как: 1) недостаточная аналитика (если АК не проводит глубокий анализ рынка и не учитывает изменения в спросе, это может привести к недостатку или избытку ВС); 2) финансовые ограничения (ограниченные финансовые ресурсы могут препятствовать своевременному обновлению парка ВС).

Следующий этап – формирование МС, где на основе графика возможного налета ВС разрабатываются маршруты, которые АК будет обслуживать. Данный процесс требует взаимодействия между следующими департаментами и подразделениями: департамент экономики, коммерческая дирекция, департамент производства полетов. На выходе получается утвержденная МС, которая определяет направления полетов и частоту рейсов, что является основой для дальнейшего создания расписания полетов. Деятельность АК на данном этапе сопровождается такими узкими местами, как: 1) неправильный выбор маршрутов (ошибки при планировании МС могут привести к низкой загрузке рейсов и убыткам); 2) конкуренция (появление новых игроков на рынке может сделать некоторые маршруты менее прибыльными).

Создание предварительного расписания полетов – третий этап, который основывается на графике налета и МС. В этом процессе принимают участие представители коммерческой дирекции и департамента производства полетов. Итогом этого этапа является расписание рейсов и план летного экипажа, что позволяет обеспечить бесперебойное выполнение рейсов с учетом доступности экипажей и ВС. Деятельность АК на данном этапе сопровождается такими узкими местами, как: 1) недостаточная гибкость (предварительное расписание не учитывает

непредвиденные обстоятельства, такие как задержки или изменения в спросе); 2) проблемы с доступностью экипажей и ВС (если не удастся эффективно управлять ресурсами, это может привести к нехватке экипажей или ВС для выполнения запланированных рейсов).

Выполнение полетов – четвертый этап, на котором на основе расписания рейсов и плана летного экипажа осуществляется фактическое выполнение полетов. В рамках данного процесса задействованы: департамент производства полетов, департамент технической дирекции, департамент наземного обеспечения перевозок, департамент подготовки авиационного персонала, департамент управления авиационной и транспортной безопасностью. На выходе формируется информация по выполненным рейсам, которая затем используется для анализа и отчетности. Данный процесс включает сбор данных о выполненных рейсах, финансовых показателях и уровне обслуживания клиентов. На вход сюда поступают данные из предыдущих этапов, а на выходе формируется информация по выполненным рейсам. Деятельность АК на данном этапе сопровождается такими узкими местами, как: 1) проблемы с безопасностью (недостаток подготовки экипажа и ВС АК может привести к инцидентам, что негативно скажется на репутации АК); 2) задержки и отмена рейсов (непредвиденные задержки рейсов могут вызвать цепные реакции, влияя на другие рейсы АК, что сопровождается уровнем удовлетворенности клиентов).

Анализ и отчетность АК представляет собой сквозной процесс, который сопровождает деятельность АК при базовом производственном процессе. Данный процесс включает в себя взаимодействие нескольких ключевых департаментов и подразделений (департамент экономики, бухгалтерия, департамент сервиса и маркетинга, департамент информационных технологий и информационной безопасности, департамент по корпоративному управлению и закупочной деятельности), каждое из которых играет важную роль в обеспечении эффективности и прозрачности финансовых и операционных показателей. Процесс анализа и отчетности в АК является многоуровневым и многогранным, требующим координации между различными подразделениями. Эффективное взаимодействие этих департаментов позволяет не только обеспечить точность отчетности, но и выработать стратегии для повышения конкурентоспособности и устойчивости АК в условиях динамичного рынка. Деятельность АК на данном этапе сопровождается такими узкими местами, как: 1) неэффективная система учета (если системы сбора данных не интегрированы или работают с ошибками, это может затруднить анализ и принятие решений); 2) изменения рыночных условий (быстрые изменения в отрасли, такие как изменения в законодательстве или конкурентной среде, могут сделать собранные данные менее актуальными).

Следовательно, в базовом производственном процессе АК, а также в узких местах можно выделить несколько групп рисков, которые могут негативно повлиять на операционную эффективность, безопасность и финансовую устойчивость компании: 1) операционные риски (включают: задержки рейсов, нарушения безопасности); 2) макроэкономические и финансовые риски (включают: изменения в ценах на топливо, экономические колебания); 3) бизнес-риски (включают: качество обслуживания, проблемы с безопасностью). Управление этими рисками требует комплексного подхода, включающего регулярный анализ процессов, внедрение современных технологий, обучение персонала и активное взаимодействие между подразделениями. Принятие превентивных мер и последующая разработка стратегий реагирования на кризисные ситуации помогут минимизировать потенциальные негативные последствия для АК.

Исходя из проведенного анализа в данном исследовании, можно сказать, что АК сталкиваются с различными рисками, которые могут существенно повлиять на их деятельность и финансовые результаты. Риски связаны как с базовым производственным процессом АК, так и с другими факторами (например, кризисные ситуации). Для эффективного управления этими рисками целесообразно классифицировать их на несколько групп: макроэкономические, бизнес-, комплаенс-, финансовые и операционные риски. Рассмотрим каждую из этих групп подробнее:

А. *Макроэкономические риски* связаны с изменениями в экономической среде, которые могут оказать влияние на спрос на авиаперевозки. К таким рискам относятся колебания валютных курсов, инфляция, изменения в уровне доходов населения и экономический спад. Например, в условиях рецессии количество пассажиров может снизиться, что негативно скажется на доходах АК. Также макроэкономические факторы могут влиять на стоимость топлива и другие операционные расходы.

Б. *Бизнес-риски* связаны с особенностями авиационной отрасли и могут включать в себя конкуренцию между АК, изменения в потребительских предпочтениях и влияние новых технологий. Например, появление бюджетных авиаперевозчиков может снизить цены на билеты и уменьшить маржу прибыли традиционных АК. Рассматриваемая группа рисков АК включает в себя: Б.1) отраслевые риски; Б.2) технико-производственные риски; Б.3) риски эпидемий, техногенных катастроф и стихийных бедствий; Б.4) стратегические риски.

В. *Комплаенс-риски* возникают из-за необходимости соблюдения различных законодательных и регуляторных требований. Для АК это может включать соблюдение норм безопасности, экологии, защиты прав потребителей и антимонопольного законодательства. Невыполнение этих требований может привести к штрафам, судебным разбирательствам и репутационным потерям. Важно отметить, что правила могут различаться в зависимости от региона и страны, что добавляет сложности в управление комплаенс-рисками.

Г. *Финансовые риски* связаны с изменениями в финансовых показателях АК, которые могут повлиять на ее способность выполнять обязательства. К ним относятся кредитные риски (невозможность возврата кредитов) и ликвидные риски (недостаток средств для покрытия текущих обязательств). АК часто используют заемные средства для финансирования своих операций, что делает их уязвимыми к изменениям в процентных ставках и условиям доступа к капиталу.

Д. *Операционные риски* возникают в процессе ежедневной деятельности АК и могут включать сбои в расписании рейсов, проблемы с обслуживанием клиентов и управление персоналом. Эти риски могут быть вызваны как внутренними факторами (например, недостаточной квалификацией сотрудников), так и внешними (например, неблагоприятными погодными условиями). Эффективное управление операционными рисками требует четкой организации процессов и постоянного мониторинга ситуации.

Эффективное управление рисками в АК требует системного подхода и глубокого анализа каждой группы рисков. В связи с чем в табл. 3 приведен реестр рисков, отражающий вероятность их возникновения и степень их влияния. Для наиболее объективной оценки вероятностей возникновения и степени влияния каждого из рисков была собрана группа из 15 экспертов, которые были опрошены посредством анкетирования. В нее вошли пять сотрудников АК, три представителя государственного и муниципального управления, четыре эксперта

по управлению компаниями и риск-менеджменту и три члена профессорско-преподавательского состава соответствующих предметных областей. Исходя из полученных оценок экспертов были рассчитаны средние значения по каждому риску в реестре.

Таблица 3. Реестр рисков для АК

№ п/п	Группа рисков	Риск	Среднее значение вероятности на основе опроса экспертной группы, балл	Вероятность	Среднее значение степени влияния на основе опроса экспертной группы, балл	Степень влияния
1	Макроэкономические	Рыночные риски (изменение цен и курсов валют, инфляция, экономический спад)	4,1	Высокая	4	Сильное
2	Макроэкономические	Региональные риски	3,3	Средняя	3,9	Сильное
3	Бизнес-риски	Отраслевые риски (рост конкуренции, изменение предпочтений пользователей)	1,9	Низкая	3,2	Умеренное
4	Бизнес-риски	Технико-производственные риски (техническое состояние самолетов, инфраструктуры, качество запчастей и материалов)	4,2	Высокая	4,1	Сильное
5	Бизнес-риски	Риск эпидемий, техногенных катастроф, стихийных бедствий	3,9	Высокая	3	Умеренное
6	Бизнес-риски	Стратегические риски (ошибки планирования, неопределенность государственной политики)	1,8	Низкая	4,3	Сильное
7	Комплаенс-риски	Изменения в законодательстве (налоговые и правовые риски)	2,1	Низкая	3,1	Умеренное
8	Комплаенс-риски	Нарушение норм безопасности сотрудниками АК	2	Низкая	1,9	Слабое

№ п/п	Группа рисков	Риск	Среднее значение вероятности на основе опроса экспертной группы, балл	Вероятность	Среднее значение степени влияния на основе опроса экспертной группы, балл	Степень влияния
9	Комплаенс-риски	Нарушение экологических норм	2,1	Низкая	2	Слабое
10	Комплаенс-риски	Нарушение прав потребителей	4,1	Высокая	1,7	Слабое
11	Финансовые	Кредитные риски (невозможность возврата кредитов дебиторами)	1,2	Очень низкая	3,3	Умеренное
12	Финансовые	Ликвидные риски (недостаток средств у АК)	1	Очень низкая	4,8	Очень сильное
13	Операционные	Задержка/отмена рейсов	4	Высокая	1,8	Слабое
14	Операционные	Проблемы с обслуживанием потребителей	4,8	Очень высокая	1,7	Слабое
15	Операционные	Кадровые риски (увольнение/недостаток квалифицированного персонала)	2,3	Низкая	2,8	Умеренное
16	Операционные	Риски авиационной и транспортной безопасности (акты незаконного вмешательства)	1,9	Низкая	4,7	Очень сильное
17	Операционные	IT-риски (технические сбои, утечки, проблемы, связанные с использованием информационных технологий)	3,2	Средняя	3,9	Сильное

Источник: составлено авторами по данным экспертной оценки

При объединении вероятности и степени влияния была сформирована матрица рисков (тепловая карта), изображенная на рис. 2. Карта рисков помогает установить приоритеты в распределении ресурсов при управлении рисками, предоставляет информацию о внешних угрозах для заинтересованных сторон, формирует общую картину для руководства компании и распределяет ответственность за риски между менеджерами. Риски, попадающие в красную

зону квадранта, представляют собой наибольшую угрозу для организации как по уровню влияния, так и по вероятности их возникновения (в меньшей степени).

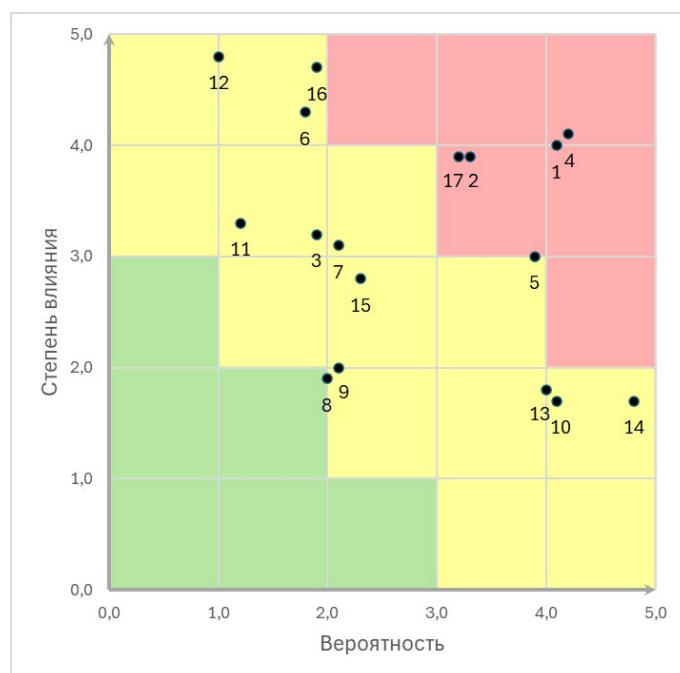


Рисунок 2. Тепловая карта рисков

Источник: составлено авторами по данным в табл. 3

Рыночные риски, такие как изменение цен и курсов валют, инфляция и экономический спад, имеют высокую вероятность возникновения и значительное влияние на финансовые результаты АК (рис. 2), что делает их критически важными для анализа заинтересованными сторонами. Данные риски могут существенно повлиять на доходы и операционные расходы, что требует активного участия различных департаментов/подразделений в разработке стратегий их минимизации. Кроме того, понимание влияния рыночных рисков на различные подразделения поможет обеспечить более эффективное управление ресурсами и адаптацию к изменяющимся условиям рынка. Таким образом, анализ данного риска позволяет АК быть более устойчивой к внешним экономическим шокам и улучшить свою конкурентоспособность.

Эффективное управление рыночными рисками требует активного участия ключевых департаментов и подразделений, таких, как департамент экономики, коммерческая дирекция и департамент по корпоративному управлению и закупочной деятельности, которые могут напрямую влиять на финансовую устойчивость АК. В то же время другие департаменты и подразделения могут поддерживать общую стратегию управления рисками через оптимизацию процессов и повышение эффективности работы.

5. Обсуждение

Для структуризации информации об управлении рыночными рисками в АК была составлена онтологическая схема (рис. 3), которая описывает возможные риски и действия подразделений, способные управлять данными рисками. Онтологическая схема представляет собой систематизированную визуализацию результатов, позволяет отразить не только данные, но связи и иерархии между ними. (Matushin et al., 2014) Подобный структурный подход к визуализации результатов не был ранее представлен в исследованиях по данной теме.

Основное внимание в описании рисков уделено рыночным рискам, которые разделены на пять подгрупп. Для каждой подгруппы установлены действия подразделений, направленные на управление данными рисками.

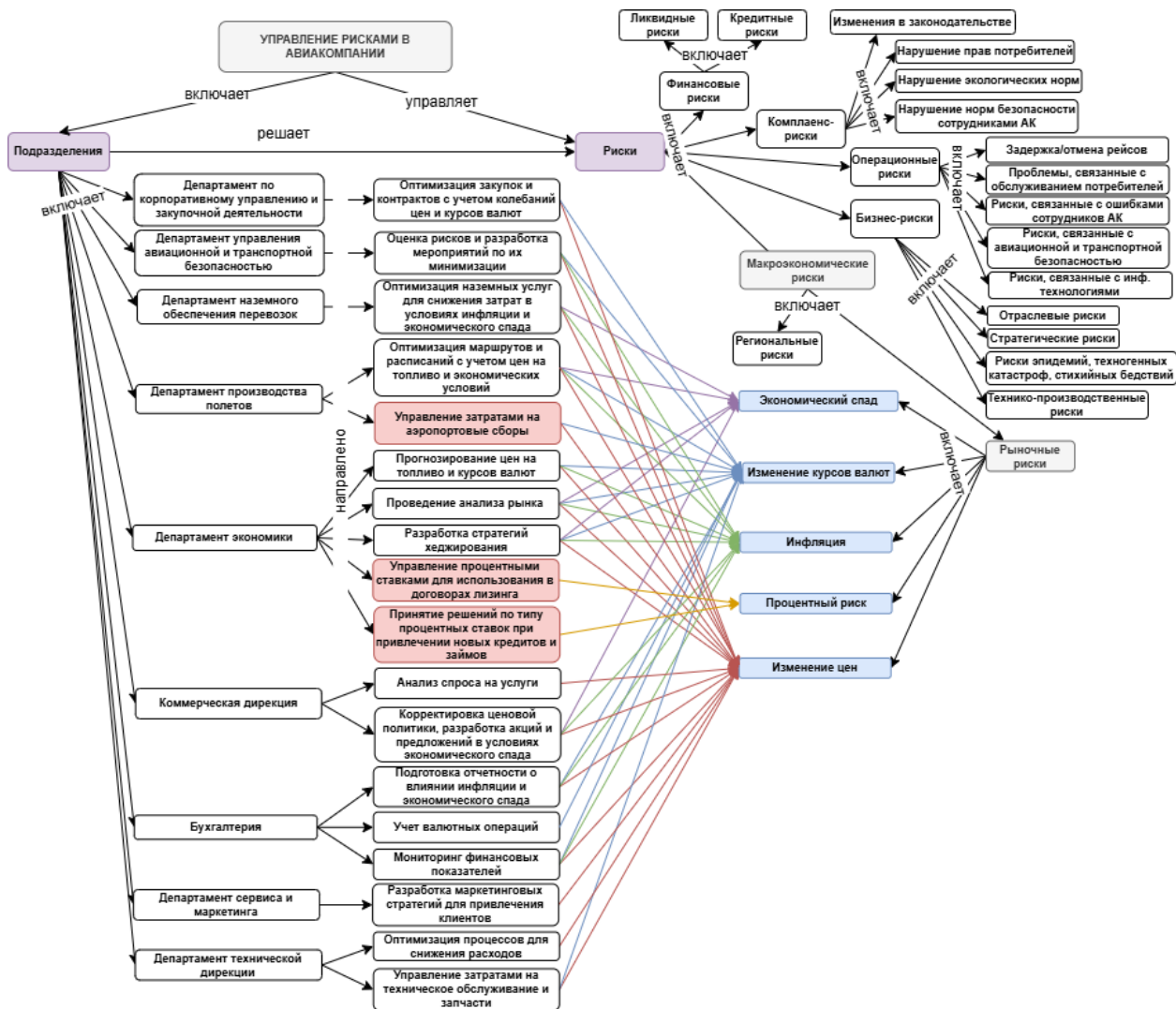


Рисунок 3. Онтологическое представление управления рыночными рисками в АК

Источник: составлено авторами

- Сиреневые стрелки на схеме обозначают связь между подразделениями и группой рисков, связанных с экономическим спадом.
- Синие стрелки показывают связь между действиями подразделений и рисками изменения курсов валют.
- Зеленые стрелки указывают на действия подразделений, направленные на управление рисками, возникающими из-за инфляции.
- Оранжевые стрелки обозначают действия подразделений для управления процентным риском.
- Красные стрелки обозначают действия подразделений по управлению группой рисков, связанных с изменением цен.

В отличие от работ (Opfer, 2015; Karyakin et al., 2023), ключевым вкладом данного исследования являются проведение количественной оценки, основанной на мнении экспертов, а

также построение онтологической схемы для визуализации результатов исследования рыночных рисков в АК. Это позволило сформировать наиболее полное представление о существующих рыночных рисках в авиационной отрасли и департаментах, которые могут управлять данными рисками.

6. Выводы

В ходе исследования была подтверждена гипотеза о том, что эффективность внедрения системы риск-менеджмента в АК напрямую зависит от качества анализа ключевых производственных процессов. Проведенный анализ показал, что детальное и точное понимание этих процессов позволяет более эффективно идентифицировать уязвимости и потенциальные риски, что, в свою очередь, способствует улучшению управления рисками.

Цель исследования была достигнута. Построен базовый производственный процесс АК, проанализированы риски, влияющие на ее деятельность, и сформирован реестр рисков. Также была составлена онтологическая схема действий департаментов и подразделений АК при работе с риском, оказывающим наибольшее влияние на ее деятельность – «Рыночные риски (изменение цен и курсов валют, инфляция, экономический спад)».

Таким образом, внедрение системы риск-менеджмента не только минимизирует воздействие макроэкономических, бизнес-, комплаенс-, финансовых и операционных рисков, но и способствует созданию более устойчивой и конкурентоспособной АК. Эффективное управление рисками становится важным инструментом для обеспечения долгосрочной стабильности и успеха АК в условиях быстро меняющейся внешней среды.

В результате проведенного исследования были выявлены ключевые аспекты, требующие дальнейшего изучения, что открывает новые горизонты для улучшения систем риск-менеджмента в АК. Ниже представлены перспективные направления для будущих исследований: 1) разработка интегрированных подходов к управлению рисками: исследование возможностей интеграции систем риск-менеджмента с другими управленческими системами (например, качеством, безопасностью) для создания единой платформы управления; 2) анализ влияния цифровизации на риск-менеджмент: изучение того, как современные технологии (большие данные, искусственный интеллект) могут повысить качество анализа рисков и улучшить процессы принятия решений. Эти направления могут способствовать дальнейшему развитию теории и практики риск-менеджмента в авиационной отрасли, а также помочь АК адаптироваться к новым вызовам и требованиям рынка.

Список литературы

- Afzalov, A.M., Nesterova, V.K., Nugmanova, T.R., Khayrullina, A.D., 2024. Analiz riskov PAO «Aeroflot» i rekomendatsii dlya ikh predotvrashcheniya [Risk analysis of PJSC Aeroflot and recommendations for their prevention]. *Vektor nauchnoy mysli* [The vector of scientific thought] 1, 210–216.
- Borkova, Ye.A., Ivanova, A.A., Zelenina D.D., 2022. Sanktsii protiv Rossii i ikh vliyaniye na globalnyye ekonomicheskiye posledstviya [Sanctions against Russia and their impact on global economic consequences], in: *Aktualnyye problemy razvitiya sotsialno-ekonomicheskikh sistem: teoriya i praktika* [Actual problems of socio-economic systems development: theory and practice]. Southwest State University, Kursk, pp. 68–71.
- Burdina, A.A., Moskvicheva, N.V., Melik-Aslanova, N.O., 2021. Management of Complex Risk of the Airline's Activities in order to Ensure Economic Security. *TEM Journal* 10 (4), 1534. <https://doi.org/10.18421/TEM104-06>
- Fokeev, M.A., 2022b. Business models transformation of Russian airlines: Influence of the coronavirus crisis. *Vestnik of Saint Petersburg University. Management* 21 (2), 284–313. <http://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2022.206>
- Fokeev, M.A., 2022a. The Russian Passenger Air Transportation: Crisis Responses and Directions for Recovery. *ECO* 1 (571), 96–120. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-1-96-120>
- Fomichev, A.N., 2020. Risk-menedzhment. *Dashkov i K*, Moscow.
- Fomkin, A.B., Popova, E.S., 2019. Airline Risk Management Specifics. *Methods of Quality Management* 3, 16–20.
- Galiyeva, Yu.D., 2024. Risk-menedzhment v aviatsionnoy bezopasnosti [Risk management in aviation security], in: *Resursosbergayushchiye tekhnologii v kontrole, upravlenii kachestvom i bezopasnosti* [Resource-saving technologies in quality control, management and safety], Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, pp. 65–70.

- Gertsik, Yu.G., 2016. Vnedreniye sistem menedzhmenta kachestva i risk-menedzhmenta v zdavookhraneni i meditsinskoj promyshlennosti [Implementation of quality management and risk management systems in healthcare and medical industry]. *Healthcare Management: News, Views, Education. Bulletin of VSHOUZ 2* (4), 92–93.
- Gorbatenko, A.N., 2013. Risk Management as Factor of Competitiveness Enhancement of Companies. *Microeconomics 2*, 27–32.
- Iurovskikh, E.A., Slukina, S.A., 2022. Russian Region Airlines. Actual Problems and Perspectives, in: *Vesenniye dni nauki [Spring Days of Science]*. Ural Federal University, Yekaterinburg, pp. C. 439–445.
- Karelina, M.G., 2019. Empirical research of the development of risk management in the corporate sector of Russia's economy. *Theoretical and Applied Economics 4*, 111–121. <https://doi.org/10.25136/2409-8647.2019.4.31538>
- Karyakin, A.M., Velikorosov, V.V., Ivanova, O.E., Akulinin, F.V., Ozerov, S.L., 2023. Russian Airline Risk Assessment. *Regional and Branch Economy 1*, 8–15. https://doi.org/10.47576/2949-1916_2023_1_8
- Knyazhskiy, A.Yu., Plyasovskikh A.P., Shatrakov, N.A., 2019. Necessity For Regional Aviation Development in Russia. *Crede Experto 3*, 8–16.
- Kubichek, V.V., Kislennok, A.A., 2013. Reputation Risks for Airlines. *Uchenyye zametki TOGU [Academic notes of Pacific National University]*, 4 (4), 119–124.
- Kuznetsova, M.O., 2019. Risk Management Implementation Practices in Russian Industrial Companies: Results of an Empirical Study. *Strategic Decisions and Risk Management 10* (4), 410–423. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2019-4-410-423>
- Lieberman, P.Yu., Yastrebov A.P., 2020. Analysis And Evaluation of the Effectiveness of Risk Management in Aviation Activities. *Quality. Innovation. Education 6*, 58–64. DOI: <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2020-6-58-64>
- Matushin, M.M., Vakurina, T.G., Kotelya, V. V., Skobelev, P.O., et al., 2014. Methods and Software for Creation of Ontologies for Visualizing Connected Information Objects of Random Nature in Complex Information-Analytical Systems. *Information and Control Systems 2* (69), 9–17.
- Matyukha, S.V., 2022. Macroeconomic Crises: The Impact of The Pandemic and Geopolitical Risks on Russian Civil Aviation. *Transport business of Russia 2*, 37–40. DOI: https://doi.org/10.52375/20728689_2022_2_37
- Medvedeva, E.P., 2020. Organization of Integrated Risk Management in Organization. *Vestnik nauki i obrazovaniya [Bulletin of Science and Education]* 24 (78) (4), 23–26.
- Mendes, N., Vieira, J.G.V., Mano, A.P., 2022. Risk management in aviation maintenance: A systematic literature review. *Safety Science 153*, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105810>
- Mikhalev, K.A., 2024. Krizis v ekonomike grazhdanskoj aviatsii [Crisis in the economy of civil aviation]. *Sbornik trudov molodykh uchenykh i studentov XIV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rossiya i mir» [Proceedings of young scientists and students of the 14th International Scientific and Practical Conference "Russia and the World"]*, Moscow: V.V. Zhirinovsky University of World Civilizations Publishing House, pp. 403–409.
- Muftakhova, O.S., 2015. To the Definition of the Concept of "Manufacturing Process". *Proceedings of Irkutsk State Technical University 8* (103), 197–202.
- Nazarova, Ye.N., Nazarova, A.N., 2022. Vliyaniye vosmogo paketa sanktsiy na ekonomiku Rossii v period spetsialnoy voyennoy operatsii [The impact of the eighth package of sanctions on the Russian economy during the special military operation]. *Aktualnyye voprosy ustoychivogo razvitiya gosudarstva, obshchestva i ekonomiki [Current issues of sustainable development of the state, society and economy]*. Kurskaya akademiya gosudarstvennoy i munitsipalnoy sluzhby, Kursk, pp. 274–276.
- Nikolishvili, D.Z., 2022. Measures of State Support for the Aviation Industry and the Impact of the Coronavirus Pandemic on the Global air Transportation Market. *The world of new economy 16* (2), 103–110. <http://doi.org/10.26794/2220-6469-2022-16-2-103-110>
- Opfer, E.A., 2015. Risk-Management in University Educational Quality Management. *Higher Education in Russia 10*, 84–91.
- Palamarchuk, G.I., Liberman, P.Yu., 2022. Risk Management Imperatives in Aviation Activity. *Proceedings of Petersburg Transport University 19* (3) 489–497.
- Paristova, L.P., Khayrullin, R.F., 2012. The Modern Methods of Risk-Management in Civil Aviation Area. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii [Bulletin of the St.-Petersburg state university of civil aircraft]* 1 (3), 96–102.
- Pekhtereva, E.A., 2021. Passenger air travel during the COVID-19 pandemic. *Economic and Social Problems of Russia. 2021 3* (47), 13–36. <https://doi.org/10.31249/espr/2021.03.01>
- Pishchalkina, I.Yu., Tereshko, E.K., Suloeva, S.B., 2021. Quantitative risk assessment of investment projects using digital technologies. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics 14* (3), 125–137. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.14310>
- Polzikova, E.V., Yurchenko, A.A., 2020. Analysis of the pandemic impact on aviatransportation and tourism in Russia. *Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management 2*, 98–103. DOI: <https://doi.org/10.31775/2305-3100-2020-2-98-103>
- Portnyagin, I.G., Romantsev, A.N., 2020. Formation of green infrastructure in the system of ensuring economic security of aviation transport. *Innovation & Investment 6*, 299–302.
- Price, J., Forrest, J., 2024. *Practical Aviation Security: Predicting and Preventing Future Threats*. Elsevier.
- Sharov, V.D., Vorobyov, V.V., Zatuchny, D.A., 2021. *Risk Management Methods in the Aviation Enterprise*. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6017-4>
- Skorba, K.A., Sharabayeva, L.Yu., 2020. Opisaniye biznes-protsessov aviakompanii [Description of the airline's business processes]. *Vestnik Belogo generala [Bulletin of the White General]* 3, 80–90.
- Stadnik, S.V., 2012. State Aviation Risks Analysis: Innovative Methods for Cost Factors Calculation. *Izvestiya Sochi State University 4*, 127–132.
- Stepanenko, E.V., Sheverdin, M.A., Nizametdinov, R.R., 2020. The Business Processes of the Airline and the Airport: Commonalities and Differences. *Nauchnyy vestnik GosNII GA [Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation]* 33, 69–77.
- Taluyev, I.A., 2010. Riski, svyazannyye s deyatelnostyu aviakompanii [Risks associated with the airline's activities]. *Civil Aviation High Technologies 156*, 150–155.
- Tuturov, S.A., Nayshev, M.V., 2006. Otsenka effektivnosti deyatelnosti aviakompanii i puti yeye povysheniya [Evaluation of the airline's performance and ways to improve it]. *Civil Aviation High Technologies 106*, 101–108.
- Voronin, S.A., Samsonov, A.D., 2014. Ugrozy bezopasnosti, riski i upravleniye riskami primenitelno k grazhdanskoj aviatsii [Security threats, risks and risk management in relation to civil aviation]. *Nauchnyy vestnik GosNII GA [Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation]* 6, 78–82.
- Zhakov, V.V., Alieva, S.G., 2021. Analysis of the Activities of the Airline of JSC "Siberia" with the Purpose of Identification and Minimization of the Influence Economic Risk Factors. *Sciences of Europe 83* (3), 3–6.

References

- Afzalov, A.M., Nesterova, V.K., Nugmanova, T.R., Khayrullina, A.D., 2024. Analiz riskov PAO «Aeroflot» i rekomendatsii dlya ikh predotvrashcheniya [Risk analysis of PJSC Aeroflot and recommendations for their prevention]. *Vektor nauchnoy mysli [The vector of scientific thought]* 1, 210–216.
- Borkova, Ye.A., Ivanova, A.A., Zelenina D.D., 2022. Sanktsii protiv Rossii i ikh vliyaniye na globalnyye ekonomicheskiye posledstviya [Sanctions against Russia and their impact on global economic consequences], in: *Aktualnyye problemy razvitiya sotsialno-ekonomicheskikh sistem: teoriya i praktika [Actual problems of socio-economic systems development: theory and practice]*. Southwest State University, Kursk, pp. 68–71.

- Burdina, A.A., Moskvicheva, N.V., Melik-Aslanova, N.O., 2021. Management of Complex Risk of the Airline's Activities in order to Ensure Economic Security. *TEM Journal* 10 (4), 1534. <https://doi.org/10.18421/TEM104-06>
- Fokeev, M.A., 2022b. Business models transformation of Russian airlines: Influence of the coronavirus crisis. *Vestnik of Saint Petersburg University. Management* 21 (2), 284–313. <http://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2022.206>
- Fokeev, M.A., 2022a. The Russian Passenger Air Transportation: Crisis Responses and Directions for Recovery. *ECO* 1 (571), 96–120. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-1-96-120>
- Fomichev, A.N., 2020. Risk-menedzhment. *Dashkov i K*, Moscow.
- Fomkin, A.B., Popova, E.S., 2019. Airline Risk Management Specifics. *Methods of Quality Management* 3, 16–20.
- Galiyeva, Yu.D., 2024. Risk-menedzhment v aviatsionnoy bezopasnosti [Risk management in aviation security], in: *Resursoberegayushchiye tekhnologii v kontrole, upravlenii kachestvom i bezopasnosti* [Resource-saving technologies in quality control, management and safety], Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, pp. 65–70.
- Gertsik, Yu.G., 2016. Vnedreniye sistem menedzhmenta kachestva i risk-menedzhmenta v zdravookhraneni i meditsinskoj promyshlennosti [Implementation of quality management and risk management systems in healthcare and medical industry]. *Healthcare Management: News, Views, Education. Bulletin of VSHOUZ* 2 (4), 92–93.
- Gorbatenko, A.N., 2013. Risk Management as Factor of Competitiveness Enhancement of Companies. *Microeconomics* 2, 27–32.
- Iurovskikh, E.A., Slukina, S.A., 2022. Russian Region Airlines. Actual Problems and Perspectives, in: *Vesenniye dni nauki* [Spring Days of Science]. Ural Federal University, Yekaterinburg, pp. C. 439–445.
- Karelina, M.G., 2019. Empirical research of the development of risk management in the corporate sector of Russia's economy. *Theoretical and Applied Economics* 4, 111–121. <https://doi.org/10.25136/2409-8647.2019.4.31538>
- Karyakin, A.M., Velikorossov, V.V., Ivanova, O.E., Akulinin, F.V., Ozerov, S.L., 2023. Russian Airline Risk Assessment. *Regional and Branch Economy* 1, 8–15. https://doi.org/10.47576/2949-1916_2023_1_8
- Knyazhskiy, A.Yu., Plyasovskikh A.P., Shatrakov, N.A., 2019. Necessity For Regional Aviation Development in Russia. *Crede Experto* 3, 8–16.
- Kubichek, V.V., Kisljenok, A.A., 2013. Reputation Risks for Airlines. *Uchenyye zametki TOGU* [Academic notes of Pacific National University], 4 (4), 119–124.
- Kuznetsova, M.O., 2019. Risk Management Implementation Practices in Russian Industrial Companies: Results of an Empirical Study. *Strategic Decisions and Risk Management* 10 (4), 410–423. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2019-4-410-423>
- Lieberman, P.Yu., Yastrebov A.P., 2020. Analysis And Evaluation of the Effectiveness of Risk Management in Aviation Activities. *Quality. Innovation. Education* 6, 58–64. DOI: <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2020-6-58-64>
- Matushin, M.M., Vakurina, T.G., Kotelya, V. V., Skobelev, P.O., et al., 2014. Methods and Software for Creation of Ontologies for Visualizing Connected Information Objects of Random Nature in Complex Information-Analytical Systems. *Information and Control Systems* 2 (69), 9–17.
- Matyukha, S.V., 2022. Macroeconomic Crises: The Impact of The Pandemic and Geopolitical Risks on Russian Civil Aviation. *Transport business of Russia* 2, 37–40. DOI: https://doi.org/10.52375/20728689_2022_2_37
- Medvedeva, E.P., 2020. Organization of Integrated Risk Management in Organization. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education] 24 (78) (4), 23–26.
- Mendes, N., Vieira, J.G.V., Mano, A.P., 2022. Risk management in aviation maintenance: A systematic literature review. *Safety Science* 153, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105810>
- Mikhalev, K.A., 2024. Krizis v ekonomike grazhdanskoj aviatsii [Crisis in the economy of civil aviation]. *Sbornik trudov molodykh uchenykh i studentov XIV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rossiya i mir»* [Proceedings of young scientists and students of the 14th International Scientific and Practical Conference "Russia and the World"], Moscow: V.V. Zhirinovskiy University of World Civilizations Publishing House, pp. 403–409.
- Muftakhova, O.S., 2015. To the Definition of the Concept of "Manufacturing Process". *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 8 (103), 197–202.
- Nazarova, Ye.N., Nazarova, A.N., 2022. Vliyaniye vosmogo paketa sanktsiy na ekonomiku Rossii v period spetsialnoy voyennoy operatsii [The impact of the eighth package of sanctions on the Russian economy during the special military operation]. *Aktualnyye voprosy ustoychivogo razvitiya gosudarstva, obshchestva i ekonomiki* [Current issues of sustainable development of the state, society and economy]. *Kurskaya akademiya gosudarstvennoy i munitsipalnoy sluzhby*, Kursk, pp. 274–276.
- Nikolishvili, D.Z., 2022. Measures of State Support for the Aviation Industry and the Impact of the Coronavirus Pandemic on the Global air Transportation Market. *The world of new economy* 16 (2), 103–110. <http://doi.org/10.26794/2220-6469-2022-16-2-103-110>
- Opfer, E.A., 2015. Risk-Management in University Educational Quality Management. *Higher Education in Russia* 10, 84–91.
- Palamarchuk, G.I., Liberman, P.Yu., 2022. Risk Management Imperatives in Aviation Activity. *Proceedings of Petersburg Transport University* 19 (3) 489–497.
- Paristova, L.P., Khayrullin, R.F., 2012. The Modern Methods of Risk-Management in Civil Aviation Area. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii* [Bulletin of the St.-Petersburg state university of civil aircraft] 1 (3), 96–102.
- Pekhtereva, E.A., 2021. Passenger air travel during the COVID-19 pandemic. *Economic and Social Problems of Russia*. 2021 3 (47), 13–36. <https://doi.org/10.31249/espr/2021.03.01>
- Pishchalkina, I.Yu., Tereshko, E.K., Suloeva, S.B., 2021. Quantitative risk assessment of investment projects using digital technologies. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics* 14 (3), 125–137. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.14310>
- Polzikova, E.V., Yurchenko, A.A., 2020. Analysis of the pandemic impact on aviation transportation and tourism in Russia. *Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management* 2, 98–103. DOI: <https://doi.org/10.31775/2305-3100-2020-2-98-103>
- Portnyagin, I.G., Romantsev, A.N., 2020. Formation of green infrastructure in the system of ensuring economic security of aviation transport. *Innovation & Investment* 6, 299–302.
- Price, J., Forrest, J., 2024. *Practical Aviation Security: Predicting and Preventing Future Threats*. Elsevier.
- Sharov, V.D., Vorobyov, V.V., Zatuchny, D.A., 2021. *Risk Management Methods in the Aviation Enterprise*. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6017-4>
- Skorba, K.A., Sharabayeva, L.Yu., 2020. Opisaniye biznes-protsessov aviakompanii [Description of the airline's business processes]. *Vestnik Belogo generala* [Bulletin of the White General] 3, 80–90.
- Stadnik, S.V., 2012. State Aviation Risks Analysis: Innovative Methods for Cost Factors Calculation. *Izvestiya Sochi State University* 4, 127–132.
- Stepanenko, E.V., Sheverdin, M.A., Nizametdinov, R.R., 2020. The Business Processes of the Airline and the Airport: Commonalities and Differences. *Nauchnyy vestnik GosNII GA* [Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation] 33, 69–77.
- Taluyev, I.A., 2010. Riski, svyazannyye s deyatelnostyu aviakompanii [Risks associated with the airline's activities]. *Civil Aviation High Technologies* 156, 150–155.
- Tuturov, S.A., Nayshev, M.V., 2006. Otsenka effektivnosti deyatelnosti aviakompanii i puti yeye povysheniya [Evaluation of the airline's performance and ways to improve it]. *Civil Aviation High Technologies* 106, 101–108.
- Voronin, S.A., Samsonov, A.D., 2014. Ugrozy bezopasnosti, riski i upravleniye riskami primenitelno k grazhdanskoj aviatsii [Security threats, risks and risk management in relation to civil aviation]. *Nauchnyy vestnik GosNII GA* [Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation] 6, 78–82.
- Zhakov, V.V., Alieva, S.G., 2021. Analysis of the Activities of the Airline of JSC "Siberia" with the Purpose of Identification and Minimization of the Influence Economic Risk Factors. *Sciences of Europe* 83 (3), 3–6.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025, одобрена после рецензирования 20.05.2025, принята к публикации 04.06.2025.

The article was submitted 10.05.2025, approved after reviewing 20.05.2025, accepted for publication 04.06.2025.

Информация об авторах:

1. Екатерина Терешко, кандидат экономических наук, научный сотрудник лаборатории Промышленные системы потоковой обработки данных, ПИИШ «Цифровой инжиниринг» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; доцент Высшей инженерно-экономической школы ИПМЭиТ СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0001-7117-7549>, ektereshko@mail.ru.

2. Анастасия Северюхина, инженер лаборатории Промышленные системы потоковой обработки данных, ПИИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0009-1710-3413>, a.severiukhina@yandex.ru.

About the authors:

1. Ekaterina Tereshko, Researcher at the Laboratory of Industrial Data Streaming Systems, Advanced Engineering School "Digital Engineering" of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Associate Professor at the Higher School of Engineering and Economics of the Institute of Industrial Management, Economics and Trade of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-7117-7549>, ektereshko@mail.ru.

2. Anastasia Severyukhina, Engineer at the Industrial Streaming Data Processing Systems Laboratory, SPbPU Digital Engineering, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0009-0009-1710-3413>, a.severiukhina@yandex.ru.

Научная статья

УДК 004

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.3>

МОДУЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ С ОБЕЗЛИЧЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ

Даниил Маврин*, Ирина Брусакова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), daniil.mavrin02@gmail.com, brusakovai@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: daniil.mavrin02@gmail.com

Аннотация

Развитие цифровых технологий в здравоохранении сопровождается ростом объема медицинских данных и повышением требований к их защите. В условиях фрагментации информационных систем и нормативных ограничений на обработку персональной информации сохраняется потребность в архитектурах, обеспечивающих аналитическую обработку без доступа к идентифицируемым данным. Цель исследования заключается в разработке и обосновании концептуальной архитектуры аналитической платформы для учреждений здравоохранения, обеспечивающей нормативное соответствие, модульную интеграцию с действующими медицинскими информационными системами, поддержку локального и облачного развертывания, применение машинного обучения для предиктивной аналитики и визуализацию ключевых управленческих показателей. Объектом исследования выступили процессы управления медицинскими учреждениями на основе анализа обезличенных данных. Методологический подход включал системный анализ, архитектурное моделирование и разработку визуальных схем, описывающих структуру, взаимодействие и бизнес-модель платформы. В результате сформирована архитектура, включающая два варианта развертывания (облачный и локальный), модули интеграции и визуализации, а также механизмы безопасного обмена данными. Разработаны архитектурные схемы и BPMN-схемы, иллюстрирующие организацию компонентов и финансовую модель. Выводы подтверждают применимость предложенного подхода для цифровой трансформации медицинских учреждений с учетом нормативных и инфраструктурных ограничений. Исследование создает основу для последующего прототипирования и внедрения в пилотных проектах.

Ключевые слова: аналитическая платформа; модульная архитектура; цифровое здравоохранение; обезличенные данные; предиктивная аналитика; информационная безопасность.

Цитирование: Маврин, Д., Брусакова, И., 2025. Модульная Архитектура Аналитической Платформы Здравоохранения с Обезличенной Обработкой Данных. *Sustainable Development and Engineering Economics* 2, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.3>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Маврин, Д., Брусакова, И., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.3>

MODULAR ARCHITECTURE OF A HEALTHCARE ANALYTICS PLATFORM WITH DE-IDENTIFIED DATA PROCESSING

Daniil Mavrin*, Irina Brusakova

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", daniil.mavrin02@gmail.com, brusakovai@mail.ru

*Corresponding author: daniil.mavrin02@gmail.com

Abstract

The digitalization of healthcare has led to a rapid increase in data volume alongside growing demands for privacy and regulatory compliance. In this context, many healthcare organizations face difficulties integrating fragmented information systems while maintaining full control over sensitive data. This paper proposes a conceptual framework for a modular analytics platform designed to support predictive decision-making in medical institutions without direct access to identifiable patient information. The study focuses on the digital transformation of healthcare management processes using de-identified institutional data. The methodology combines systems analysis with architectural modeling, resulting in a set of structured diagrams that describe the platform's deployment logic, component interaction, and business model. The proposed architecture supports both cloud-based and on-premises deployment options, allowing institutions to choose between flexibility and full data sovereignty. The platform includes modules for integration and visualization, along with secure API-based data exchange mechanisms. Architectural and BPMN diagrams are presented to illustrate the platform structure and subscription-based financial model. The results demonstrate the feasibility of implementing the proposed architecture in healthcare environments constrained by legal, technical, and organizational factors. The concept provides a foundation for future prototyping and pilot deployment in healthcare systems aiming to achieve secure, scalable analytics.

Keywords: analytics platform; modular architecture; digital healthcare; de-identified data; predictive analytics; information security.

Citation: Mavrin, D., Brusakova, I., 2025. Modular Architecture of a Healthcare Analytics Platform with De-identified Data Processing. *Sustainable Development and Engineering Economics* 2, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.3>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Mavrin, D., Brusakova, I., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Объектом настоящего исследования являются процессы управления деятельностью медицинских учреждений на основе интеллектуального анализа данных и применения моделей машинного обучения. Эти процессы охватывают широкий спектр задач — от организации потоков пациентов и планирования ресурсов до стратегического управления на уровне региональных и федеральных систем здравоохранения. Современные медицинские информационные системы (МИС), включая единую государственную информационную систему в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ), аккумулируют значительные объемы гетерогенной информации: электронные медицинские карты, расписания приема, диагностические результаты, логи посещений и др. (Batko, Slezak, 2022). Однако, несмотря на цифровизацию, большая часть этих данных остается неинтегрированной и не используется для полноценной аналитики.

Актуальность работы обусловлена одновременно как объективной потребностью в оптимизации работы учреждений здравоохранения, так и текущими нормативными, технологическими и организационными ограничениями. Международные стратегии цифрового здравоохранения, такие как WHO Global Strategy on Digital Health 2020–2025 (Awraham et al., 2022), и государственные программы России («Цифровая экономика», приказ Минздрава РФ № 1238н от 30.12.2020) декларируют необходимость создания систем поддержки принятия решений, основанных на данных. Вместе с тем, отечественная нормативная база, в частности Федеральный закон № 152-ФЗ «О персональных данных», ограничивает использование централизованных решений и требует внедрения подходов, обеспечивающих локальную и обезличенную обработку медицинской информации.

Научная проблема, лежащая в основе исследования, заключается в отсутствии архитектурных решений, способных одновременно: (1) учитывать гетерогенность и фрагментированность данных; (2) обеспечивать соответствие нормативным требованиям по защите персональных данных; (3) предлагать предиктивные инструменты аналитики, применимые в реальных условиях российских медицинских учреждений. Предиктивная аналитика в данном контексте понимается как применение методов машинного обучения и статистического моделирования для выявления скрытых закономерностей в массивах медицинских данных и прогнозирования вероятности наступления тех или иных событий. Основная бизнес-потребность внедрения таких инструментов заключается в повышении эффективности управления медицинскими учреждениями: предиктивные модели позволяют прогнозировать загрузку коечного фонда, потребность в лекарственных средствах, кадровые дефициты и риски осложнений у пациентов, что обеспечивает более рациональное распределение ресурсов и повышение качества медицинской помощи.

Как отмечается в работах Badawy (Badawy et al. 2024) и Borges (Borges et al. 2021), глобальной проблемой остается отсутствие унифицированных аналитических пайплайнов (последовательности автоматизированных процедур сбора, очистки, обработки и интерпретации данных) и надежных механизмов интеграции источников, что особенно остро проявляется в медицинском секторе. Аналогичные выводы содержатся в российских исследованиях: Морозова Ю.А. (Морозова Ю.А., 2020) подчеркивает слабую совместимость локальных МИС, а Карцхия А.А. (Карцхия А.А., 2023) — недостаточную регламентацию обмена данными в рамках ЕГИСЗ.

Предыдущие исследования в области цифровизации здравоохранения охватывают отдельные аспекты — применение ИИ, визуализацию данных, архитектуру обмена медицинской информацией (Vest, 2010; Jayathissa et al., 2023), а также методы обеспечения конфиденциальности, включая дифференциальную приватность и федеративное обучение (Dwork, Roth, 2014; Kaissis, 2020). Однако, как показывают обзоры Saberi (Saberi et al., 2025) и Nisevic (Nisevic et al., 2025), эти решения, как правило, не адаптированы к реалиям стран с ограниченными ресурсами и жесткими регуляторными барьерами, таких как Россия. Существующий научный ландшафт не предлагает готовых платформенных решений, объединяющих все указанные аспекты в единую, практико-ориентированную архитектуру, пригодную для масштабирования в медицинских учреждениях РФ.

Ключевая идея исследования заключается в создании интеллектуальной аналитической платформы, ориентированной на условия российской правовой среды и технологической инфраструктуры. В отличие от зарубежных решений, платформа спроектирована с учетом необходимости локальной обработки и обезличивания данных, не требует глубокой модификации существующих МИС и обеспечивает гибкое масштабирование. Ее архитектура основана на модульном принципе: предиктивная аналитика, визуализация, API-интеграция, безопасность. Каждая составляющая может быть адаптирована под особенности учреждения, а их взаимодействие позволяет выстраивать сквозные сценарии аналитики без нарушения законодательства.

Целью исследования является разработка и обоснование концептуальной архитектуры аналитической платформы для учреждений здравоохранения, обеспечивающей:

- соответствие нормативным требованиям по защите персональных данных;
- модульную интеграцию с действующими МИС;
- поддержку локального и облачного развертывания;
- применение машинного обучения для предиктивной аналитики;
- визуализацию ключевых управленческих показателей.

2. Обзор литературы

В последние десятилетия аналитика данных становится важным инструментом трансформации здравоохранения, предоставляя новые подходы к управлению потоками пациентов, логистикой, кадровыми ресурсами и качеством медицинской помощи. Как подчеркивают Raghupathi A. и Raghupathi W. (Raghupathi et al., 2014), здравоохранение является одним из крупнейших источников и потребителей больших данных, а потенциал использования аналитики для повышения эффективности и снижения затрат признан на международном уровне. Тем не менее, применение методов интеллектуального анализа в медицинской практике сопряжено с рядом ограничений — правовых, технических и инфраструктурных.

Одним из наиболее активно исследуемых направлений является применение предиктивных моделей для оптимизации расписаний и снижения времени ожидания. В работе Liu et al. (Liu et al., 2021) описана система XIAO YI, реализованная в китайских клиниках, которая сократила медианное время ожидания с 1,97 до 0,38 часов. Аналогично, Morales et al. (Morales et al., 2022) предложили гибридную модель симуляции и оптимизации, позволившую в условиях ограниченных ресурсов выравнять нагрузку на персонал. Согласно систематическому обзору Vecillas et al. (Vecillas et al., 2025), методы дискретно-событийного моделирования (DES) обеспечили сокращение времени ожидания на 15–30 % в 22 амбулаторных учреждениях.

Тем не менее, несмотря на высокую эффективность точечных решений, существует обоснованная критика их ограниченной масштабируемости. В обзоре Saberi et al. (Saberi et al., 2025) показано, что большинство инициатив по обмену медицинской информацией реализуются на уровне отдельных учреждений без создания архитектуры, пригодной для межведомственного взаимодействия. Подобные проблемы описаны Jayathissa et al. (Jayathissa et al., 2023) применительно к странам с ограниченными ресурсами, где инфраструктурные и нормативные барьеры препятствуют стандартизации обмена медицинскими данными даже при наличии формальных стандартов HL7 или FHIR.

Вопросы межведомственного взаимодействия и стандартизации информационных потоков давно находятся в центре внимания зарубежных и отечественных исследователей. Так, концепция Health Information Exchange (HIE), изложенная в работе Vest и Kash (Vest et al., 2010), предлагает архитектурные принципы построения систем обмена данными между учреждениями здравоохранения, страховыми фондами и государственными органами. Однако авторы подчеркивают, что даже в условиях развитой цифровой инфраструктуры сохраняются проблемы совместимости стандартов и неопределенности правового регулирования.

Российские исследования подтверждают аналогичные выводы. Гогина О.А. (Гогина О.А., 2017) указывает на отсутствие полноценных механизмов совместимости между различными МИС, что делает невозможным сквозной анализ. Журавлев М.С. (Журавлев М.С., 2021) акцентирует внимание на недостаточной нормативной проработке механизмов межведомственного обмена в рамках ЕГИСЗ. Более того, как отмечает Отставнова Е.А. (Отставнова Е.А., 2023), цифровизация здравоохранения в России развивается фрагментарно, и до сих пор отсутствует единый подход к архитектуре медицинских ИС, особенно в части разграничения прав доступа и правового регулирования конфиденциальности.

Ключевым вызовом при внедрении аналитических систем в медицине остается обеспечение конфиденциальности и правовой защиты персональных данных. Теоретические основы этого направления заложены в работах Dwork и Roth (Dwork et al. 2014), предложивших концепцию дифференциальной приватности. Альтернативные модели, включая федеративное обучение, исследованы Kaissis et al. (Kaissis et al., 2020), где подчеркивается возможность обучения ИИ без передачи исходных данных. Однако, как указывает Nisevic et al. (Nisevic et al., 2025), даже синтетические данные не исключают юридических и этических рисков, требующих детальной правовой регламентации.

Современные тенденции в регулировании обработки персональных данных в России и за рубежом свидетельствуют о возрастающей сложности нормативных требований, предъявляемых к разработке и эксплуатации аналитических систем в здравоохранении. Как показывает анализ последних изменений в российском законодательстве, представленный Ковалевым (Ковалев С.Д., 2024), усиливается контроль за операторами данных: вводятся обязательства по уведомлению Роскомнадзора, ужесточаются требования к уничтожению персональной информации, ограничивается использование биометрических данных вне государственных платформ и увеличиваются санкции за нарушения. Эти меры требуют от архитектурных решений не только формального соответствия, но и способности оперативно адаптироваться к обновляемым нормативным требованиям. На фоне этих процессов особенно значимым становится международный сравнительный контекст, рассмотренный в работе Гиш, Ржевской и Медведевой (Гиш et al., 2023). Исследование показывает, что в отличие от европейского подхода, ориентированного на защиту прав субъектов данных (GDPR), российская

модель акцентирует внимание на локализации и государственном контроле, тогда как в США отсутствует единая нормативная база. Таким образом, эффективность цифровых решений в здравоохранении во многом определяется их способностью учитывать юрисдикционные особенности и встроенность в правовую инфраструктуру конкретной страны.

Дополнительный аспект, редко рассматриваемый в технической литературе, касается общественного отношения к использованию медицинских данных в научных целях. Как показало эмпирическое исследование Richter et al. (Richter et al., 2021), большинство пациентов в Германии поддерживают идею предоставления обезличенных данных для исследований по модели «data donation» с возможностью простого отказа (opt-out), при условии соблюдения законодательных гарантий и недопущения передачи данных коммерческим структурам без контроля. Это подчеркивает важность не только технологических, но и нормативно-этических механизмов обеспечения доверия в построении аналитических платформ.

Сравнительный анализ международных и отечественных публикаций выявляет существенный разрыв между декларацией стратегий цифровизации и фактической реализацией. Несмотря на наличие множества частных решений, не существует унифицированных архитектур, позволяющих совмещать аналитическую обработку, визуализацию, защищенную интеграцию и нормативное соответствие в единой платформе. Это особенно актуально для России, где закон № 152-ФЗ ограничивает использование централизованных решений и требует локальной, обезличенной аналитики. Как подчеркивается в аналитических докладах Минздрава РФ, необходимо создавать условия для использования отечественного ПО, минимизируя риски утечек и внешнего доступа. Дополнительную значимость приобретает курс на технологический суверенитет и импортозамещение, закрепленный в национальных стратегиях цифровой трансформации: развитие отечественных цифровых решений становится не только технической, но и государственной задачей. В условиях внешнеэкономических ограничений и санкционного давления устойчивость здравоохранения напрямую зависит от способности развивать независимую цифровую инфраструктуру.

Кроме того, анализ архитектурных и организационных решений показывает, что большинство описанных в литературе систем не адаптированы к условиям отсутствия прямого доступа к персонализированным данным, что делает их непригодными для реализации в РФ без значительной переработки. Так, в работе Borges et al. (Borges et al., 2021) и обзоре Badawy et al. (Badawy et al., 2024) показано, что существующие платформы требуют полной централизации данных и не предлагают безопасных моделей локального анализа.

Таким образом, в существующей научной литературе отсутствуют универсальные решения, которые бы одновременно:

- поддерживали модульную и масштабируемую архитектуру;
- обеспечивали обработку данных в обезличенном виде в соответствии с российским законодательством;
- использовали отечественные технологии (включая LLM и API-интеграцию);
- интегрировались с уже существующими МИС без их модификации;
- предоставляли инструменты визуализации и поддержки принятия решений в медицинских учреждениях.

На этом фоне научная новизна настоящей работы заключается в разработке единой архитектурной модели, ориентированной на российский контекст, учитывающей как

технические, так и правовые особенности, и восполняющей очевидный пробел в существующих публикациях. Предлагаемое решение сочетает интеллектуальную обработку медицинских данных, соблюдение регламентов безопасности, совместимость с действующими системами и удобные интерфейсы визуализации. Подобный подход открывает путь к построению децентрализованных, но интегрированных систем здравоохранения, адаптированных к реалиям Российской Федерации.

3. Материалы и методы

Настоящее исследование носит концептуальный характер и направлено на разработку универсального подхода к оптимизации работы медицинских учреждений посредством интеллектуального анализа данных и применения методов машинного обучения. Целью работы, как уже было установлено во введении, является формирование воспроизводимой архитектурной модели, способной интегрироваться с существующими медицинскими информационными системами, обеспечивать межведомственную интеграцию медучреждений и иных учреждений государственной важности, локальную предиктивную аналитику, защищенный обмен обезличенными данными и соответствие требованиям российского законодательства.

Объектом исследования выступают процессы управления и цифровой трансформации деятельности медицинских организаций в Российской Федерации, основанные на анализе разнородных информационных массивов: электронных медицинских карт, журналов посещаемости, расписаний приема, статистики заболеваемости и других данных, которые в большинстве случаев хранятся в неструктурированном виде внутри локальных МИС. Наличие фрагментированных источников, отсутствие единого формата обмена и сложность согласования данных между уровнями системы здравоохранения обуславливают необходимость создания архитектуры, которая допускает как частичную автономность, так и модульную интеграцию компонентов.

Методологической основой исследования послужили принципы системного анализа, проектирования модульных архитектур и инжиниринга данных в условиях нормативных ограничений. Исходя из этого, исследование включало несколько этапов, выстроенных в логике последовательной формализации требований, архитектурного проектирования и технической верификации.

На первом этапе был выполнен аналитический обзор научной и прикладной литературы, а также нормативных документов, отражающих современные требования к цифровым решениям в здравоохранении. На основании анализа были выявлены ключевые ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании архитектуры: (1) невозможность универсального применения централизованных облачных платформ, поскольку часть учреждений — особенно ведомственные структуры — не допускают передачу данных вне внутреннего периметра и требуют полного локального контроля; (2) отсутствие адаптированных решений, способных интегрироваться с существующими медицинскими информационными системами без их модификации; (3) потребность в таких инструментах аналитики, которые способны функционировать без доступа к идентифицируемым персональным данным, в условиях строгих регламентов по безопасности и конфиденциальности.

Следующий этап включал формализацию функциональных и технических требований к будущей платформе. В качестве базовых принципов были заложены: (1) модульность архитектуры с возможностью адаптации под конкретное учреждение; (2) интеграция с

существующими системами через API и стандарты HL7/FHIR; (3) обеспечение юридически корректной обезличенной обработки информации; (4) приоритет использования отечественных программных решений — таких как Yandex GPT, GigaChat и совместимые инструменты визуализации.

На основе сформулированных требований была разработана концептуальная архитектура платформы. Ее структура включает в себя три ключевых компонента: модуль предиктивной аналитики, предназначенный для прогнозирования нагрузки и оценки рисков; модуль визуализации, ориентированный на построение дашбордов, графиков и интерактивных карт для руководства ЛПУ; а также модуль взаимодействия с внешними системами, обеспечивающий защищенный обмен данными и синхронизацию с государственными ИС. Особенностью архитектуры является ее двухуровневое развертывание: облачное (SaaS), ориентированное на учреждения с невысокими требованиями к безопасности, и локальное (in-house), предназначенное для организаций, где критична защита данных. В каждом случае предусмотрены механизмы фильтрации, маскировки и шифрования информации, исключающие возможность обратной идентификации пациента.

Применение машинного обучения в рамках предлагаемой аналитической платформы включает использование таких инструментов, как методы классификации (для выявления групп риска среди пациентов), регрессии (для прогнозирования длительности госпитализации и потребности в ресурсах), кластеризации (для сегментации потоков пациентов и выявления скрытых закономерностей в обращаемости), а также ансамблевых моделей и нейронных сетей (для повышения точности прогнозов). В сфере здравоохранения данные инструменты позволяют решать задачи прогнозирования загрузки коечного фонда, планирования кадровых ресурсов, оценки вероятности осложнений у конкретных пациентов, выявления неэффективных маршрутов оказания помощи и оптимизации закупок лекарственных препаратов. Бизнес-потребность их внедрения заключается в повышении управляемости медицинских учреждений, снижении издержек, сокращении времени ожидания помощи и повышении качества медицинских услуг за счет опоры на данные и объективные прогнозные оценки.

На заключительном этапе исследования была произведена визуализация ключевых аспектов архитектуры и бизнес-модели предлагаемой платформы. Были разработаны графические схемы, дополняющие описание концептуального решения и иллюстрирующие его техническую и организационную реализацию. В частности, подготовлены: (1) архитектурная схема облачного развертывания платформы (SaaS-модель), демонстрирующая структуру взаимодействия между пользователями и серверной частью системы; (2) архитектурная схема локального (in-house) развертывания, отражающая особенности изолированного исполнения и локального контроля над данными; (3) схема взаимодействия компонентов системы при межведомственном обмене через API-интерфейсы; (4) BPMN-схема, описывающая процесс подписной оплаты и форматы взаимодействия пользователей с разработчиком при доступе к вычислительным ресурсам. Эти материалы будут представлены и прокомментированы в разделе «Результаты» для более наглядного раскрытия предложенного решения.

Таким образом, разработанная методология демонстрирует последовательный воспроизводимый подход к проектированию аналитической платформы, адаптированной под российскую нормативную среду и технические реалии. Предложенное решение может быть реализовано другими исследователями, ИТ-специалистами или учреждениями здравоохранения в рамках пилотных или отраслевых проектов цифровой трансформации.

4. Результаты

В ходе проведенного исследования была разработана концептуальная архитектура аналитической платформы, предназначенной для поддержки управленческих решений в медицинских учреждениях за счет интеллектуального анализа обезличенных данных, интеграции с существующими информационными системами и визуализации ключевых показателей. Полученные результаты представляют собой взаимосвязанную систему технических и организационных решений, объединенных в модульную структуру, способную адаптироваться под различные условия эксплуатации.

Архитектурная модель: SaaS и in-house

Разработанная архитектура платформы включает два взаимодополняющих варианта развертывания — облачный (SaaS) и локальный (in-house), каждый из которых ориентирован на определенный тип медицинской организации и уровень требований к информационной безопасности.

Облачная модель (SaaS) реализуется как сервис, размещенный на инфраструктуре поставщика, к которому пользователи получают доступ через защищенный веб-интерфейс. Основные преимущества модели включают: (1) отсутствие необходимости в собственной ИТ-инфраструктуре на стороне клиента; (2) минимальные затраты на внедрение; (3) возможность быстрого масштабирования системы при росте объема данных; (4) автоматическое обновление компонентов. Эта модель оптимальна для учреждений, не имеющих строгих регламентов по локализации данных и ориентированных на оперативное использование аналитических инструментов без значительных капиталовложений.

Архитектура облачной модели (SaaS) представлена на рис. 1.

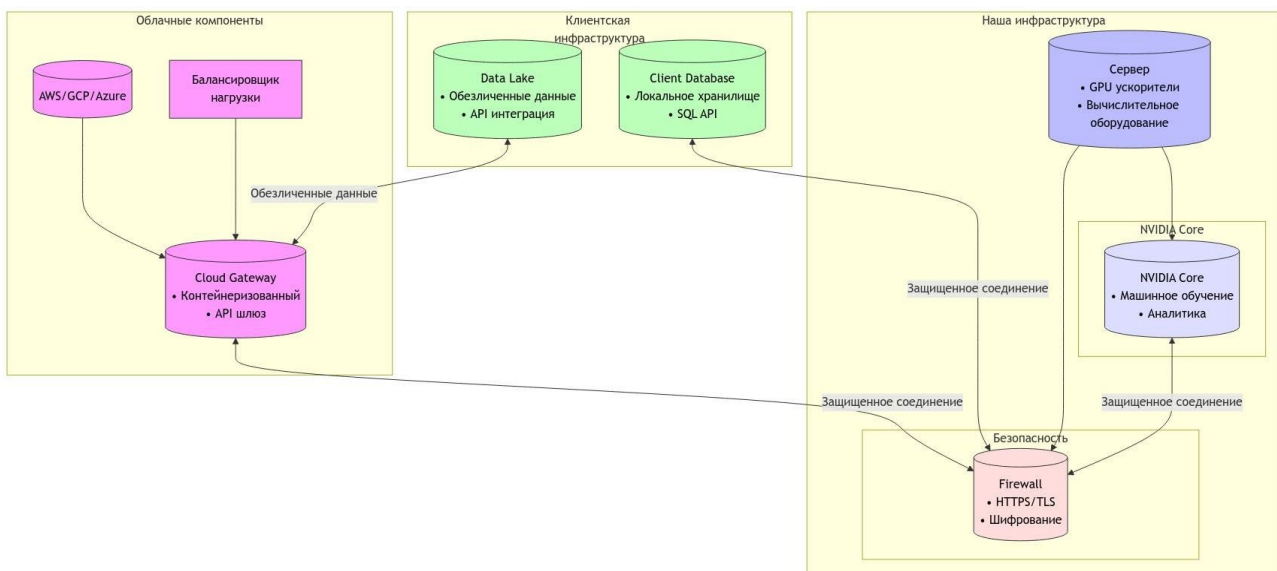


Рисунок 1. SaaS (облачное) решение

Локальная модель (in-house), напротив, предполагает полное размещение всех компонентов платформы на серверах медицинского учреждения. Такой подход обеспечивает максимальный уровень контроля над данными и соответствует требованиям учреждений с особыми мерами защиты информации, включая ведомственные клиники, оборонные и закрытые структуры. Особенности in-house модели: (1) единовременная закупка программного пакета и оборудования; (2) настройка внутреннего доступа без выхода за периметр учреждения; (3)

техническая поддержка и обновления по подписке. Такой формат позволяет достичь полной автономности при сохранении совместимости с другими участниками системы.

Архитектура локального решения (in-house) представлена на рис.2.

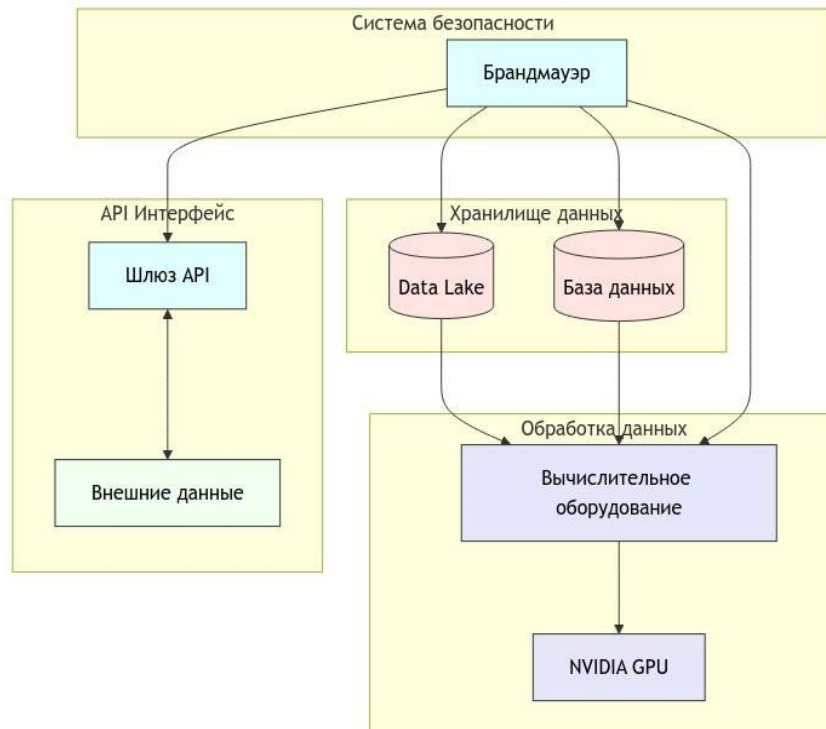


Рисунок 2. Локальное решение

Взаимодействие между компонентами

Ключевой особенностью платформы является возможность безопасного взаимодействия между учреждениями, использующими разные модели развертывания. Через API-коннекторы осуществляется защищенный обмен обезличенными данными, что позволяет, с одной стороны, интегрировать локальные вычисления с облачными модулями аналитики и визуализации, а с другой — формировать единое пространство обмена данными между учреждениями разного профиля.

Модель предполагает, что участники с повышенными требованиями к безопасности подключаются к системе через интерфейсы, полностью исключающие передачу необезличенной информации. Таким образом, достигается гибкий баланс между автономностью и межведомственным взаимодействием. Модель взаимодействия обеих систем представлена на рис.3.

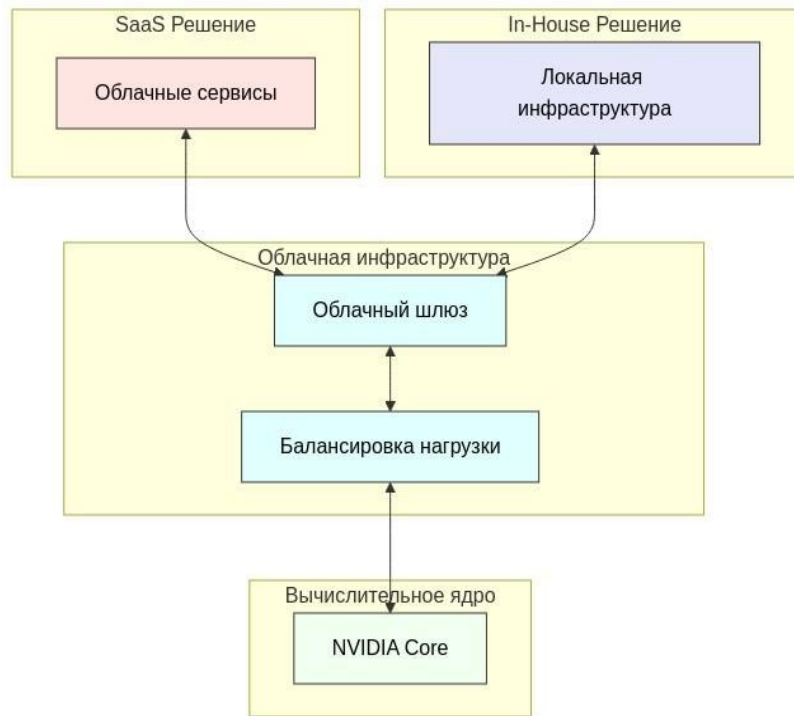


Рисунок 3. Модель взаимодействия систем через API

Финансовая модель и цикл подписки

Важным результатом исследования стало проектирование прозрачной и устойчивой финансовой модели, позволяющей масштабировать платформу без дополнительных организационных затрат со стороны медицинских учреждений. Для этого была разработана BPMN-схема, отражающая цикл оплаты и обслуживания программного обеспечения. В случае облачного решения учреждение ежемесячно оплачивает подписку с доступом к аналитическим инструментам и вычислительным мощностям. В локальной модели оплата делится на начальный лицензионный пакет и последующую техническую поддержку.

Цикл оплаты подписки отображен на BPMN-схеме. Для удобства просмотра она разделена на две части (рис.4 и рис.5).

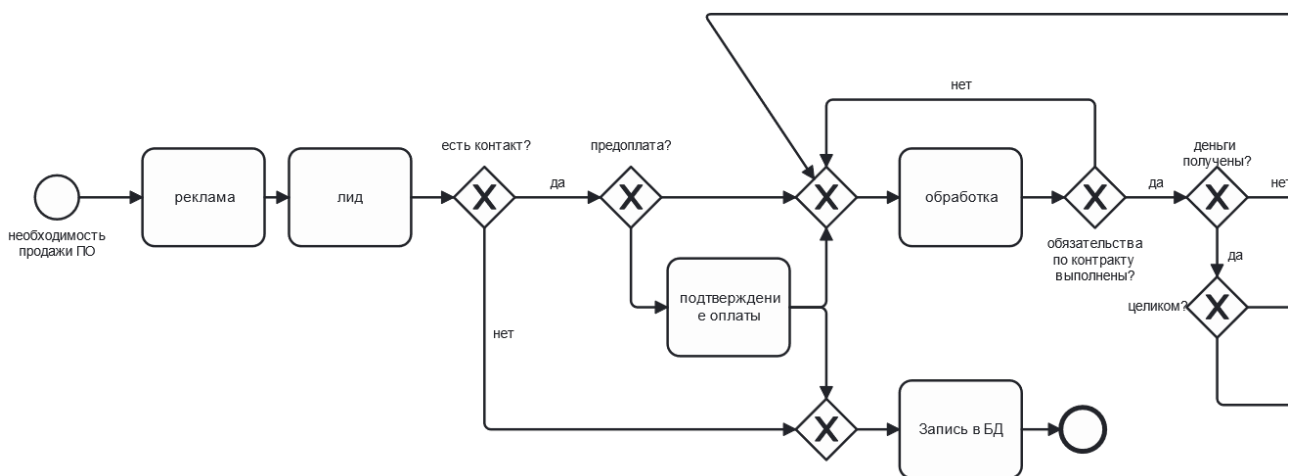


Рисунок 4. BPMN схема оплаты подписки (часть 1)

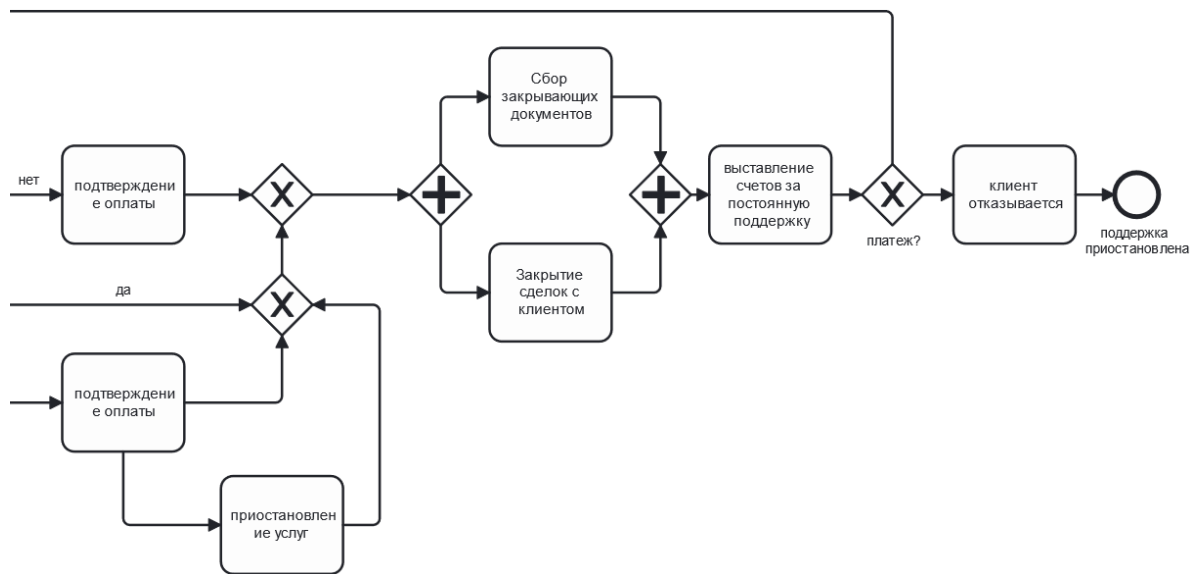


Рисунок 5. BPMN схема оплаты подписки (часть 2)

Диаграмма отражает полный цикл подписки на аналитическую платформу — от формирования запроса до сопровождения клиента.

1. Реклама и лид. Формирование потока потенциальных клиентов. В медучреждениях соответствует информированию о новых цифровых сервисах.
2. Проверка контакта. Верификация данных и подтверждение официального канала взаимодействия (ИНН, ОГРН).
3. Предоплата и подтверждение оплаты. Юридическая фиксация финансовых обязательств. В здравоохранении возможны варианты: предоплата, казначейское сопровождение или этапные платежи.
4. Обработка и запись в БД. При отсутствии оплаты — повторное согласование; при подтверждении — регистрация договора в учетных системах.
5. Контроль исполнения обязательств. Проверка соответствия оказанных услуг условиям контракта (важно для SLA и госконтрактов).
6. Приостановка услуг. Используется при просрочке оплаты; в медучреждениях требует гибкой адаптации, чтобы не нарушать оказание помощи.
7. Закрывающие документы. Акт и счет-фактура обязательны по регламентам бухгалтерии.
8. Закрытие сделки и поддержка. Завершение договора и переход к сервисному сопровождению (обновления, консультации).
9. Отказ клиента. Фиксация прекращения подписки, например, после окончания срока госзакупки.

Каждый шаг схемы адаптирован с учетом особенностей функционирования государственных и частных медучреждений. В отличие от коммерческого сектора, здесь важна обязательность: (1) многоступенчатого согласования и предоплаты, (2) документального подтверждения каждого действия, (3) учета ограничений по приостановке жизненно важных сервисов.

Все предложенные шаги соответствуют действующим регламентам: Федеральный закон № 44-ФЗ (госзакупки), № 402-ФЗ (бухгалтерский учет), № 152-ФЗ (персональные данные). Практическая реализация требует интеграции платформы с системами документооборота, бухгалтерского учета и ЕГИСЗ.

Таким образом, BPMN-схема отражает как стандартный процесс подписки, так и специфику здравоохранения, обеспечивая нормативное соответствие и управляемость жизненного цикла взаимодействия клиента с аналитической платформой.

Такой подход позволяет учитывать специфику учреждений с разным бюджетом, численностью персонала и объемом обрабатываемых данных. Финансовая схема ориентирована на обеспечение устойчивости проекта как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

5. Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют как теоретическую обоснованность, так и прикладную ценность предложенного архитектурного решения в контексте цифровизации здравоохранения. Разработка платформы, способной сочетать обезличенную обработку медицинских данных, предиктивную аналитику и визуализацию с соблюдением нормативных требований, отвечает как вызовам современной медицинской практики, так и актуальным задачам государственной цифровой политики. Сравнительный анализ с международными исследованиями подтверждает, что предложенный подход соответствует мировым трендам, но при этом учитывает специфические ограничения, характерные для российской юрисдикции.

В зарубежной литературе активно обсуждаются эффекты от внедрения предиктивных систем в клиниках. Например, в работах Morales et al. (Morales et al., 2022) и Vecillas et al. (Vecillas et al., 2025) отмечены значительные улучшения в управлении расписанием при использовании симуляционных и аналитических моделей. Однако, в отличие от представленных там решений, наша модель ориентирована на многоуровневую архитектуру и возможность гибкого сочетания облачного и локального компонентов, что делает ее применимой в условиях ограниченного доступа к персонализированным данным. Таким образом, мы не только адаптируем лучшие практики, но и предлагаем уникальное решение, учитывающее требования законодательства РФ, задачи импортозамещения и принципы цифрового суверенитета.

Несмотря на очевидные преимущества, разработанная архитектура обладает определенными ограничениями. Прежде всего, использование предиктивной аналитики требует точной адаптации моделей к локальной статистике, что, в свою очередь, обусловлено высокой неоднородностью данных, их неполнотой и отсутствием стандартизации. Для разных типов медицинских учреждений — от поликлиник до специализированных ведомственных центров — требуется индивидуальная настройка алгоритмов и конфигурация визуальных модулей, что увеличивает стоимость и продолжительность внедрения.

Вторым важным ограничением является отсутствие в настоящее время единых протоколов интеграции между региональными и ведомственными информационными системами, особенно в рамках ЕГИСЗ. Это создает барьеры для сквозного обмена данными и требует дополнительных усилий по созданию унифицированных интерфейсов взаимодействия. Хотя архитектура платформы технически допускает масштабируемость и межведомственное взаимодействие, ее практическая реализация в этом направлении требует согласования с нормативными органами и постепенного тестирования на пилотных объектах.

Отдельного внимания заслуживает вопрос нормативной совместимости. Российское законодательство, в отличие от многих зарубежных моделей регулирования, содержит жесткие требования к обезличиванию, хранению и обработке персональных данных. Это накладывает ограничения не только на технологический стек, но и на бизнес-модель внедрения платформы. В частности, необходимо учитывать реестр отечественного ПО, сертификацию отдельных компонентов и регламентацию взаимодействия между учреждениями в условиях правовой ответственности.

Связь данного исследования с предыдущими работами автора, посвященными внедрению систем искусственного интеллекта в человеко-машинные интерфейсы и управленческие процессы, подтверждает преемственность научного подхода и расширяет область применения разработанных методов. В более ранних публикациях анализировались возможности внедрения AI-агентов в бизнес-моделирование, клиентскую поддержку и планирование, что создает прочную основу для дальнейшего перехода к моделям автоматизированного управления в медицине (Маврин Д.И., 2024).

На основе полученных результатов можно выделить несколько направлений для последующих исследований. Во-первых, актуальной задачей становится разработка и валидация математических моделей прогнозирования нагрузки, адаптированных под разные категории медицинских учреждений и типов услуг. Во-вторых, перспективным направлением является интеграция платформы с экономическими моделями оценки эффективности — для анализа возврата инвестиций, снижения издержек и повышения доступности медицинской помощи. В рамках аспирантской программы по направлению «Математические модели в экономике» возможно формализовать механизмы оценки эффективности внедрения платформы на уровне муниципалитетов или регионов.

В-третьих, особый интерес представляет развитие моделей машинного обучения с учетом специфики медицинских данных: высокой динамичности, чувствительности, частичных пропусков и ограниченного объема исторических наблюдений. Это требует использования продвинутых методов обучения с ограниченным набором данных (low-data learning), гибридных моделей и архитектур с поддержкой федеративного обучения.

Таким образом, разработанная концептуальная модель не только восполняет существующие методологические и практические пробелы, но и открывает широкие горизонты для дальнейшего научного и прикладного развития. Ее внедрение может стать важным шагом на пути к формированию устойчивой цифровой инфраструктуры здравоохранения, ориентированной на безопасность, эффективность и технологическую независимость.

6. Заключение

По итогам проведенного концептуального исследования были сформулированы следующие ключевые выводы:

1. Сформирована концептуальная архитектура аналитической платформы, предназначенной для поддержки принятия решений в медицинских учреждениях на основе интеллектуального анализа данных, с соблюдением требований нормативно-правовой базы Российской Федерации в области персональных данных.

2. Предложенная архитектура реализует двухуровневый подход к развертыванию: облачную (SaaS) модель для учреждений с невысокими требованиями к информационной

изоляции и локальную (in-house) модель для организаций, нуждающихся в полной автономии и контроле над ИТ-инфраструктурой.

3. Платформа проектируется как модульная система, обеспечивающая интеграцию с существующими МИС без их модификации, поддержку взаимодействия через стандартизированные API-интерфейсы, и возможность безопасного обмена обезличенными данными между участниками системы.

4. В рамках исследования разработан комплект схем, иллюстрирующих архитектурные и организационные компоненты платформы: архитектурные схемы для SaaS- и in-house-решений, схема взаимодействия компонентов системы, а также BPMN-схема подписного механизма оплаты. Эти схемы отражают логическую структуру решения и могут быть использованы как основа для последующего прототипирования и пилотного внедрения.

5. Сравнение с зарубежными аналогами подтверждает актуальность предложенного подхода: при соблюдении нормативных ограничений и учете специфики российских условий, архитектура обладает потенциалом снижения операционных нагрузок и повышения управляемости процессов здравоохранения.

6. Практическая значимость результатов заключается в возможности применения разработанной архитектурной модели при планировании и подготовке внедрения цифровых решений в учреждениях здравоохранения, в том числе в рамках программ импортозамещения и цифрового суверенитета.

7. Перспективы дальнейшего развития исследования включают (1) построение формализованных математических моделей оценки эффективности платформы; (2) разработку алгоритмов адаптации аналитических модулей к локальным данным; (3) подготовку к этапу экспериментальной валидации на пилотных объектах здравоохранения.

Значение данного исследования для развития отрасли заключается в формировании универсальной концептуальной модели, сочетающей обезличенную обработку медицинских данных, модульную интеграцию с действующими ИС, предиктивную аналитику на основе ИИ и визуализацию ключевых показателей. Важной особенностью модели является возможность как облачного, так и локального развертывания, что делает ее применимой для учреждений с разным уровнем цифровой зрелости и различными требованиями к безопасности. Предложенное решение может быть использовано как в рамках локальных инициатив по цифровой трансформации, так и при формировании национальных программ мониторинга и управления системой здравоохранения.

Научная новизна работы проявляется в следующем:

- впервые предложена единая архитектура, сочетающая предиктивную аналитику, визуализацию и нормативно-правовую совместимость с российскими требованиями;
- разработаны механизмы взаимодействия между локальными и облачными компонентами платформы с использованием API-коннекторов, что обеспечивает возможность защищенного обмена обезличенными данными;
- описана финансово устойчивая модель внедрения на основе подписки, учитывающая реалии бюджетных учреждений здравоохранения;
- выявлены ключевые технические и правовые закономерности, определяющие успешность внедрения подобных платформ в контексте РФ.

Таким образом, представленная работа восполняет существующий пробел в научной и практической плоскости, предлагая воспроизводимую, нормативно совместимую и масштабируемую модель интеллектуальной аналитики для медицинских учреждений, способную служить основой для построения гибкой и безопасной системы медицинской аналитики, соответствующей современным требованиям цифровизации в Российской Федерации.

Список литературы

- Awraham, B.J., Aziz Fatah, C., Hamaamin, M.Y., 2022. A review of the role and challenges of Big Data in healthcare informatics and analytics. *Comput. Intell. Neurosci.* 2022, 5317760. <https://doi.org/10.1155/2022/5317760>
- Badawy, M., Ramadan, N., Hefny, H.A., 2024. Big data analytics in healthcare: data sources, tools, challenges, and opportunities. *J. Electr. Syst. Inf. Technol.* 11, 63. <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00190-w>
- Batko, K., Ślęzak, A., 2022. The use of Big Data Analytics in healthcare. *J. Big Data* 9(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00553-4>
- Borges do Nascimento, I., Marcolino, M., Abdulazeem, H., Weerasekara, I., Azzopardi-Muscat, N., Gonçalves, M., Novillo-Ortiz, D., 2021. Impact of Big Data Analytics on People's Health: Overview of systematic reviews and recommendations for future studies. *J. Med. Internet Res.* 23(4), e27275. <https://doi.org/10.2196/27275>
- Dwork, C., Roth, A., 2014. The Algorithmic Foundations of Differential Privacy. *Found. Trends® Theor. Comput. Sci.* 9(3–4), 211–407. <https://doi.org/10.1561/04000000042>
- Gish, T.A., Rzhevskaya, N.V., Medvedeva, A.S., 2023. Analiz zakonodatelstva raznykh stran po obespecheniyu zashchity personalnykh dannykh [Analysis of the legislation of different countries on ensuring the protection of personal data]. *Auditorium* 4(40). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-zakonodatelstva-raznyh-stran-po-obespecheniyu-zashchity-personalnyh-dannyh> (accessed 06.08.2025)
- Gogina, O.A., 2017. Osnovnye standarty i modeli integratsii meditsinskikh informatsionnykh sistem [Basic standards and models for integrating medical information systems]. *Molodoy uchenyi* 18(152), 8–11. Available at: <https://moluch.ru/archive/152/43122> (accessed 30.07.2025)
- Jayathissa, P., Hewapathirana, R., 2023. Enhancing interoperability among health information systems in low- and middle-income countries: a review of challenges and strategies. *Int. J. Adv. Biol.* 10(2/3), August 2023. <https://doi.org/10.5121/ijab.2023.10301>
- Kaissis, G.A., Makowski, M.R., Rückert, D., Braren, R.F., 2020. Secure, privacy-preserving and federated machine learning in medical imaging. *Nat. Mach. Intell.* 2, 305–311. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0186-1>
- Kartskhia, A.A., 2021. Informatsionno-pravovoe obespechenie tsifrovoy ekosistemy zdavookhraneniya [Information and legal support of the digital healthcare ecosystem]. *Pravovaya informatika* 1, 13–23. <https://doi.org/10.21681/1994-1404-1-13-23>
- Kovalev, S.D., 2024. Obzor poslednikh izmenenii v Federalnom zakone “O personalnykh dannykh” [Review of recent amendments to the Federal Law “On Personal Data”]. *Agrarnoe i zemelnoe pravo* 12(240), 272–274. https://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_12_272
- Li, X., Tian, D., Li, W., Dong, B., Wang, H., Yuan, J., Li, B., Shi, L., Lin, X., Zhao, L., Liu, S., 2021. Artificial intelligence-assisted reduction in patients' waiting time for outpatient process: a retrospective cohort study. *BMC Health Serv. Res.* 21(1), 237. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06248-z>
- Mavrin, D.I., 2024a. Primenenie instrumentov biznes-modelirovaniya dlya vnedreniya GPT-bota v CRM-sistemu OOO “TKS.RU” [Application of business modeling tools for implementing a GPT bot in the CRM system of LLC “TKS.RU”]. In: *Proc. XI Int. Sci. Conf. “Nauka nastoyashego i budushchego”*, LETI, June 2024.
- Mavrin, D.I., 2024b. Iskusstvennyi intellekt kak instrument obespecheniya ustoychivogo razvitiya i tekhnologicheskogo suvereniteta Rossii [Artificial intelligence as a tool for ensuring sustainable development and technological sovereignty of Russia]. In: *Proc. Sci.-Pract. Conf. “Ustoychivoe razvitiye i tekhnologii rosta”*, LETI, 2024.
- Mavrin, D.I., 2024c. Klientskaya podderzhka s ispolzovaniem AI v sfere tamozhennogo programmnoho obespecheniya: razbor keisa [Customer support using AI in the field of customs software: a case study]. In: *Proc. X All-Russian Extramural Sci.-Pract. Conf. (Students and Young Scientists)*, 2024.
- Morales, E., Cordero, J., Sánchez, R., et al., 2024. A simulation–optimization model for appointment scheduling in public healthcare systems. *Health Syst.* (ahead of print). <https://doi.org/10.1080/20476965.2024.1234567>
- Morozova, Yu.A., 2020. Tsifrovaya transformatsiya rossiiskogo zdavookhraneniya kak faktor razvitiya otrasli [Digital transformation of Russian healthcare as a factor in the development of the industry]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* 2, 36–47. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-2-36>
- Nisevic, M., Milojevic, D., Spajic, D., 2025. Synthetic data in medicine: Legal and ethical considerations for patient profiling. *Comput. Struct. Biotechnol. J.* 28, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2025.05.026>
- Ostavnova, E.A., 2023. Konstitutsionno-pravovye osnovy tsifrovizatsii zdavookhraneniya v Rossiiskoi Federatsii [Constitutional and legal foundations of healthcare digitalization in the Russian Federation]. *Vestnik SGYuA* 3(152), 64–72. <https://doi.org/10.24412/2227-7315-2023-3152-64-72>
- Raghupathi, A., Raghupathi, V., 2014. Big Data Analytics in Healthcare: Promise and potential. *Health Inf. Sci. Syst.* 2, 3. <https://doi.org/10.1186/2047-2501-2-3>
- Richter, G., Borzikowsky, C., Hoyer, B.F., et al., 2021. Secondary research use of personal medical data: patient attitudes towards data donation. *BMC Med. Ethics* 22, 164. <https://doi.org/10.1186/s12910-021-00728-x>
- Saberi, M.A., McHeick, H., Adda, M., 2025. From data silos to health records without borders: a systematic survey on patient-centered data interoperability. *Information* 16(2), 106. <https://doi.org/10.3390/info16020106>
- Vecillas Martin, D., Berruezo Fernández, C., Gento Muncio, A.M., 2025. Systematic review of discrete event simulation in healthcare and statistics distributions. *Appl. Sci.* 15, 1861. <https://doi.org/10.3390/app15041861>
- Vest, J.R., Kash, B.A., 2010. Health information exchange: persistent challenges and new opportunities. *J. Am. Med. Inform. Assoc.* 17(3), 288–294. <https://doi.org/10.1136/jamia.2010.003673>
- Zhuravlev, M.S., 2019. Interoperabelnost kak faktor razvitiya prava v sfere elektronnoho zdavookhraneniya [Interoperability as a factor in the development of law in e-health]. *Pravo. Zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki* 3, 98–116. <https://doi.org/10.17323/2072-8166.2019.3.98.116>

References

- Awrahan, B.J., Aziz Fatah, C., Hamaamin, M.Y., 2022. A review of the role and challenges of Big Data in healthcare informatics and analytics. *Comput. Intell. Neurosci.* 2022, 5317760. <https://doi.org/10.1155/2022/5317760>
- Badawy, M., Ramadan, N., Hefny, H.A., 2024. Big data analytics in healthcare: data sources, tools, challenges, and opportunities. *J. Electr. Syst. Inf. Technol.* 11, 63. <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00190-w>
- Batko, K., Ślęzak, A., 2022. The use of Big Data Analytics in healthcare. *J. Big Data* 9(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00553-4>
- Borges do Nascimento, I., Marcolino, M., Abdulazeem, H., Weerasekara, I., Azzopardi-Muscat, N., Gonçalves, M., Novillo-Ortiz, D., 2021. Impact of Big Data Analytics on People's Health: Overview of systematic reviews and recommendations for future studies. *J. Med. Internet Res.* 23(4), e27275. <https://doi.org/10.2196/27275>
- Dwork, C., Roth, A., 2014. The Algorithmic Foundations of Differential Privacy. *Found. Trends® Theor. Comput. Sci.* 9(3–4), 211–407. <https://doi.org/10.1561/04000000042>
- Gish, T.A., Rzhvetskaya, N.V., Medvedeva, A.S., 2023. Analiz zakonodatelstva raznykh stran po obespecheniyu zashchity personalnykh dannykh [Analysis of the legislation of different countries on ensuring the protection of personal data]. *Auditorium* 4(40). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-zakonodatelstva-raznyh-stran-po-obespecheniyu-zashchity-personalnyh-dannyh> (accessed 06.08.2025)
- Gogina, O.A., 2017. Osnovnye standarty i modeli integratsii meditsinskikh informatsionnykh sistem [Basic standards and models for integrating medical information systems]. *Molodoy uchenyi* 18(152), 8–11. Available at: <https://moluch.ru/archive/152/43122> (accessed 30.07.2025)
- Jayathissa, P., Hewapathirana, R., 2023. Enhancing interoperability among health information systems in low- and middle-income countries: a review of challenges and strategies. *Int. J. Adv. Biol.* 10(2/3), August 2023. <https://doi.org/10.5121/ijab.2023.10301>
- Kaissis, G.A., Makowski, M.R., Rückert, D., Braren, R.F., 2020. Secure, privacy-preserving and federated machine learning in medical imaging. *Nat. Mach. Intell.* 2, 305–311. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0186-1>
- Kartskhia, A.A., 2021. Informatsionno-pravovoe obespechenie tsifrovoy ekosistemy zdavoookhraneniya [Information and legal support of the digital healthcare ecosystem]. *Pravovaya informatika* 1, 13–23. <https://doi.org/10.21681/1994-1404-1-13-23>
- Kovalev, S.D., 2024. Obzor poslednikh izmenenii v Federalnom zakone “O personalnykh dannykh” [Review of recent amendments to the Federal Law “On Personal Data”]. *Agrarnoe i zemelnoe pravo* 12(240), 272–274. https://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_12_272
- Li, X., Tian, D., Li, W., Dong, B., Wang, H., Yuan, J., Li, B., Shi, L., Lin, X., Zhao, L., Liu, S., 2021. Artificial intelligence-assisted reduction in patients' waiting time for outpatient process: a retrospective cohort study. *BMC Health Serv. Res.* 21(1), 237. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06248-z>
- Mavrin, D.I., 2024a. Primenenie instrumentov biznes-modelirovaniya dlya vnedreniya GPT-bota v CRM-sistemu OOO “TKS.RU” [Application of business modeling tools for implementing a GPT bot in the CRM system of LLC “TKS.RU”]. In: *Proc. XI Int. Sci. Conf. “Nauka nastoyashego i budushchego”*, LETI, June 2024.
- Mavrin, D.I., 2024b. Iskusstvennyi intellekt kak instrument obespecheniya ustoichivogo razvitiya i tekhnologicheskogo suvereniteta Rossii [Artificial intelligence as a tool for ensuring sustainable development and technological sovereignty of Russia]. In: *Proc. Sci.-Pract. Conf. “Ustoichivoe razvitie i tekhnologii rosta”*, LETI, 2024.
- Mavrin, D.I., 2024c. Klientskaya podderzhka s ispolzovaniem AI v sfere tamozhennogo programmnogo obespecheniya: razbor keisa [Customer support using AI in the field of customs software: a case study]. In: *Proc. X All-Russian Extramural Sci.-Pract. Conf. (Students and Young Scientists)*, 2024.
- Morales, E., Cordero, J., Sánchez, R., et al., 2024. A simulation–optimization model for appointment scheduling in public healthcare systems. *Health Syst.* (ahead of print). <https://doi.org/10.1080/20476965.2024.1234567>
- Morozova, Yu.A., 2020. Tsifrovaya transformatsiya rossiiskogo zdavoookhraneniya kak faktor razvitiya otrasli [Digital transformation of Russian healthcare as a factor in the development of the industry]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* 2, 36–47. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-2-36>
- Nisevic, M., Milojevic, D., Spajic, D., 2025. Synthetic data in medicine: Legal and ethical considerations for patient profiling. *Comput. Struct. Biotechnol. J.* 28, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2025.05.026>
- Ostavnova, E.A., 2023. Konstitutsionno-pravovye osnovy tsifrovizatsii zdavoookhraneniya v Rossiiskoi Federatsii [Constitutional and legal foundations of healthcare digitalization in the Russian Federation]. *Vestnik SGYuA* 3(152), 64–72. <https://doi.org/10.24412/2227-7315-2023-3152-64-72>
- Raghupathi, A., Raghupathi, V., 2014. Big Data Analytics in Healthcare: Promise and potential. *Health Inf. Sci. Syst.* 2, 3. <https://doi.org/10.1186/2047-2501-2-3>
- Richter, G., Borzikowsky, C., Hoyer, B.F., et al., 2021. Secondary research use of personal medical data: patient attitudes towards data donation. *BMC Med. Ethics* 22, 164. <https://doi.org/10.1186/s12910-021-00728-x>
- Saberi, M.A., Mcheick, H., Adda, M., 2025. From data silos to health records without borders: a systematic survey on patient-centered data interoperability. *Information* 16(2), 106. <https://doi.org/10.3390/info16020106>
- Vecillas Martin, D., Berruezo Fernández, C., Gento Muncio, A.M., 2025. Systematic review of discrete event simulation in healthcare and statistics distributions. *Appl. Sci.* 15, 1861. <https://doi.org/10.3390/app15041861>
- Vest, J.R., Kash, B.A., 2010. Health information exchange: persistent challenges and new opportunities. *J. Am. Med. Inform. Assoc.* 17(3), 288–294. <https://doi.org/10.1136/jamia.2010.003673>
- Zhuravlev, M.S., 2019. Interoperabnost kak faktor razvitiya prava v sfere elektronnoy zdavoookhraneniya [Interoperability as a factor in the development of law in e-health]. *Pravo. Zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki* 3, 98–116. <https://doi.org/10.17323/2072-8166.2019.3.98.116>

Статья поступила в редакцию 17.04.2025, одобрена после рецензирования 28.04.2025, принята к публикации 11.05.2025.

The article was submitted 17.04.2025, approved after reviewing 28.04.2025, accepted for publication 11.05.2025.

Информация об авторах:

1. Даниил Маврин, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0002-6406-6087>, daniil.mavrin02@gmail.com
2. Ирина Брусакова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-2832-7833>, brusakovai@mail.ru

About the authors:

1. Daniil Mavrin, graduate student, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0002-6406-6087>, daniil.mavrin02@gmail.com
2. Irina Brusakova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-2832-7833>, brusakovai@mail.ru

Научная статья

УДК 330.3

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.4>

ЭФФЕКТ ГРИНИУМ НА РЫНКЕ КОРПОРАТИВНЫХ ОБЛИГАЦИЙ В СТРАНАХ ЕВРОСОЮЗА

Светлана Гутман¹, Майя Егорова^{1*}, Екатерина Новикова²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, sgutman@spbstu.ru, egorova_mm@spbstu.ru

²Департамент устойчивого развития ПАО «СПБ Биржа», Москва, Россия, e.novikova@spbexchange.ru

*Автор, ответственный за переписку: egorova_mm@spbstu.ru

Аннотация

В статье был рассмотрен эффект зеленой премии (гриниум) на рынке корпоративных облигаций стран Европейского Союза. Актуальность работы обусловлена необходимостью эмпирического доказательства существования данной премии в условиях неоднородных методологических подходов к ее оценке и возрастающей роли устойчивого финансирования в контексте перехода к низкоуглеродной экономике. Целью работы является выявление и количественное измерение эффекта для корпоративных облигаций эмитентов Германии, Испании и Нидерландов с учетом национальной макроэкономической специфики и отраслевых особенностей эмитентов. Методология исследования включает формирование выборки пар сопоставимых инструментов, сравнительный анализ доходности и ликвидности, оценку корреляционных зависимостей и построение регрессионных моделей с учетом макроэкономических показателей и рыночных индикаторов. Результаты демонстрируют, что наиболее существенное и статистически значимое снижение доходности выявлено для испанских эмитентов, тогда как для немецких и нидерландских облигаций эффект оказался статистически менее значимым. Регрессионный анализ подтвердил существенное влияние на доходность традиционных макроэкономических факторов, включая уровень инфляции и безрисковую ставку. Также было выявлено статистически значимое отрицательное влияние инфляции и положительное влияние безрисковой ставки на доходность зеленых облигаций Испании, причем чувствительность к инфляции оказалась существенно выше. Качество построенных моделей было высоким, о чем свидетельствуют коэффициенты детерминации (R^2) на уровне 0.82 для классических облигаций Испании и 0.86 для зеленых облигаций Германии и Нидерландов. Полученные результаты подчеркивает важность учета национальных особенностей при разработке инвестиционных стратегий и формировании государственной политики перехода к устойчивому развитию. Практическая значимость заключается в возможности использовать результаты исследования для более глубокого анализа и разработки методологии оценки устойчивых финансовых инструментов.

Ключевые слова: устойчивое развитие, зеленые облигации, гриниум, корпоративные ценные бумаги.

Цитирование: Гутман, С., Егорова, М., Новикова, Е., 2025. Эффект Гриниум на Рынке Корпоративных Облигаций в Странах Евросоюза. *Sustainable Development and Engineering Economics* 2, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.4>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Гутман, С., Егорова, М., Новикова, Е., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.4>

THE GREENIUM EFFECT IN THE CORPORATE BOND MARKET OF EU COUNTRIES

Svetlana Gutman¹ , Maya Egorova^{1*} , Ekaterina Novikova²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, sgutman@spbstu.ru, egorova_mm@spbstu.ru

²Department of Sustainable Development of PJSC "SPB Exchange", Moscow, Russian Federation, e.novikova@spbexchange.ru

*Corresponding author: egorova_mm@spbstu.ru

Abstract

The article examined the effect of the green premium (greenium) on the corporate bond market of the European Union countries. The relevance of the work is due to the need for empirical evidence of the existence of this award in the context of heterogeneous methodological approaches to its assessment and the increasing role of sustainable financing in the context of the transition to a low-carbon economy. The aim of the work is to identify and quantify the effect for corporate bonds issued by Germany, Spain and the Netherlands, taking into account national macroeconomic specifics and industry specifics of issuers. The research methodology includes the formation of a sample of pairs of comparable instruments, a comparative analysis of profitability and liquidity, an assessment of correlation dependencies and the construction of regression models taking into account macroeconomic indicators and market indicators. The results show that the most significant and statistically significant decrease in yields was found for Spanish issuers, while the effect was statistically less significant for German and Dutch bonds. Regression analysis confirmed the significant impact on profitability of traditional macroeconomic factors, including the inflation rate and the risk-free rate. There was also a statistically significant negative impact of inflation and a positive impact of the risk-free rate on the yield of Spanish green bonds, and the sensitivity to inflation turned out to be significantly higher. The quality of the constructed models was high, as evidenced by the coefficients of determination (R²) at the level of 0.82 for classic Spanish bonds and 0.86 for green bonds of Germany and the Netherlands. The results obtained emphasize the importance of taking into account national specificities when developing investment strategies and shaping public policy for the transition to sustainable development. The practical significance lies in the possibility of using the research results for a deeper analysis and development of a methodology for assessing sustainable financial instruments.

Keywords: sustainable development, green bonds, greenium, corporate bonds.

Citation: Gutman, S., Egorova, M., Novikova, E., 2025. The Greenium Effect in the Corporate Bond Market of EU Countries. *Sustainable Development and Engineering Economics* 2, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.4>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Gutman, S., Egorova, M., Novikova, E., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

В условиях глобального перехода к низкоуглеродной экономике и реализации Целей устойчивого развития ООН финансовые рынки становятся ключевым механизмом финансирования экологических проектов. Инвесторы все чаще интегрируют ESG-факторы в свои стратегии, что проявляется в растущем спросе на устойчивые финансовые инструменты, например зеленые облигации. Наличие гринума свидетельствует о готовности инвесторов жертвовать частью доходности ради долгосрочных выгод и внимания к экологической составляющей инвестиционной стратегии.

Исследования показывают, что эффект гринума усиливается в периоды рыночной нестабильности и кризисов, например во время пандемии COVID-19 (Liberati and Marinelli, 2025). Однако после окончания кризиса эффект может ослабевать или даже исчезать, а в отдельных странах и секторах наблюдается переход от дисконта к премии по доходности зеленых облигаций из-за ужесточения денежно-кредитной политики и снижения корпоративных прибылей (Grishunin et al., 2024). Влияние макроэкономических факторов, таких как цены на нефть, ключевые процентные ставки и волатильность рынка, также существенно: рост цен на энергоносители и ужесточение политики могут снижать привлекательность зеленых инструментов (Nurvita et al., 2024).

Эмпирические доказательства существования гринума остаются противоречивыми, так как в некоторых исследованиях фиксируют устойчивую премию в размере 1–20 базисных пунктов, другие ученые отмечают ее нестабильность и зависимость от макроэкономической конъюнктуры и методологических подходов к оценке. Ряд исследований (MacAskill et al., 2021; Lau et al., 2022; Zhao et al., 2024) подтверждает его наличие, связывая его с растущим количеством ESG-ориентированных инвесторов и репутационными рисками. В то же время другие работы указывают на значительную изменчивость и нестабильность гринума, его зависимость от макроэкономической конъюнктуры, рыночной волатильности, отраслевой специфики и риска гринвошинга (Alessi et al., 2023; Hu et al., 2024). Методологические особенности выявления гринума характеризуются существенной неоднородностью подходов и отсутствием унифицированной методики исследования.

Несмотря на активное изучение гринума на глобальном и европейском уровнях, остается недостаточно исследованным вопрос о его дифференциации в разрезе отдельных стран Европейского Союза (ЕС) с учетом их национальной макроэкономической специфики и отраслевой структуры эмитентов.

Целью данного исследования является выявление и количественная оценка эффекта гринума на примере корпоративных облигаций эмитентов из Германии, Испании и Нидерландов, а также анализ факторов, влияющих на его величину. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: 1) сформировать выборку пар сопоставимых зеленых и классических облигаций; 2) провести сравнительный анализ их доходности и ликвидности; 3) построить регрессионные модели для оценки влияния макроэкономических и рыночных факторов на доходность; 4) определить статистическую значимость выявленных эффектов и проанализировать различия.

2. Обзор литературы

Одним из способов следования целям устойчивого развития является выпуск зеленых облигаций. Финансовый сектор играет ключевую роль в реализации этой концепции, в то

время как рынок зеленых финансовых инструментов становится одним из главных инструментов привлечения инвестиций в экологические проекты. Глобальные вызовы, с которыми сталкивается весь мир, оказали значительное влияние на предприятия и их деятельность по всему миру. Можно предположить, что степень вовлеченности компании в экологическую практику тесно связана с ее стоимостью. В результате «зеленые компании» начинают рассматриваться в том числе как более привлекательные для инвесторов, которые ценят долгосрочную устойчивость и охрану окружающей среды (Mrkajic et al., 2019; Zhou and Cui, 2019). Исследователи также сходятся во мнении о том, что зеленые облигации становятся более распространенными в финансовой среде; в большей степени это проявляется в отраслях, где характер деятельности связан с окружающей средой (Flammer, 2021).

Гриниум (greenium) характеризует премию или скидку за «зеленый характер» облигаций, готовность инвестора инвестировать в актив с более низкой доходностью при получении долгосрочных выгод. Предполагается, что зеленые облигации торгуются по зеленой цене, то есть существует спред между ними и классическими облигациями (MacAskill et al., 2021). Наличие «зеленой премии» свидетельствует о растущей роли устойчивого развития в инвестиционной практике. Инвесторы формируют спрос на новые финансовые инструменты, связанные с устойчивым развитием, что означает переход к идее гармоничного взаимодействия экологически ответственных инвестиций, этических принципов и долгосрочной прибыли бизнеса.

Вопрос наличия премии или скидки за «зеленость» облигации широко обсуждаются в научном сообществе. Наличие гриниума может свидетельствовать о высоком спросе инвесторов на экологические проекты (MacAskill et al., 2021), когда эмитент стремится получить экономическую выгоду в виде более низкой стоимости заимствования (Luke and Zota, 2021).

Исследователи приходят к различным результатам, доказывая (Pietsch and Salakhova, 2022; Wang et al., 2020; Löffler et al., 2021) или опровергая присутствие гриниума, так как видят его итогом механического несоответствия спроса и предложения, краткосрочным явлением (Meyer and Henide, 2023). В данной статье наличие гриниума подтверждается более значительным различием между ценами на актив при более низкой доходности к погашению. Также были рассмотрены факторы, влияющие на доходность классических и зеленых выбранных облигаций. Так, наибольшее влияние на доходность обоих типов облигаций оказывают макроэкономические факторы: уровень инфляции в стране и волатильность фондового рынка, что согласуется с результатами, полученными в (Pietsch and Salakhova, 2022), где анализируется, существует ли связь между макроэкономическими переменными и рынком зеленых облигаций и доказывается, что облигации чувствительны к макроэкономическим факторам, в том числе к волатильности финансового рынка.

3. Материалы и методы

Методологическая основа данного исследования базируется на общепринятых в международной практике подходах, которые описаны в исследованиях по тематике эффекта гриниума. В соответствии с методологией исследование проводилось в три последовательных этапа.

На первом этапе применяется метод парного сопоставления, при котором для каждой зеленой облигации подбирается классический аналог с идентичными характеристиками

эмитента, валюты, срока и объема выпуска, что позволяет минимизировать влияние несопоставимых факторов (Pirgaip and Arslan-Ayaydin, 2024).

На втором этапе анализируются спреды доходности (yield to maturity, yield to call/put) и динамика Bid-ask спредов для оценки различий в доходности и ликвидности между зелеными и обычными облигациями (Huang et. al., 2023).

На третьем этапе было проведено эконометрическое моделирование с построением регрессионных моделей для определения факторов, влияющих на величину гриниума (Liberati and Marinelli, 2025). В качестве факторов использовались макроэкономические показатели (уровень инфляции, безрисковая ставка), рыночные индикаторы (волатильность фондовых индексов) и характеристики самих облигаций (срок до погашения, показатели ликвидности).

Для анализа были отобраны корпоративные облигации эмитентов из Германии, Испании и Нидерландов, которые представляют различные секторы экономики: телекоммуникации, банковский сектор, автомобилестроение.

Анализ рынков зеленых облигаций Германии, Испании и Нидерландов обоснован их высоким уровнем зрелости и моделями развития устойчивого финансирования в ЕС. Германия выделяется как один из крупнейших и наиболее развитых рынков зеленых облигаций с масштабным выпуском государственных бумаг и развитой нормативной базой, что формирует глобальный бенчмарк и привлекает широкий круг инвесторов (Mudretsov and Prudnikova, 2024). Динамичный рост зеленого сегмента в Испании во многом обусловлен государственными инициативами, такими как налоговые стимулы и программы поддержки в рамках Европейского зеленого курса и национальных планов восстановления. Введение налоговых льгот для экологических инвестиций способствовало увеличению внедрения энергоэффективных технологий, особенно среди малых предприятий, хотя эффект оказался неоднородным: инвестиции в более чистые технологии выросли, но в некоторых случаях наблюдалось сокращение числа «зеленых» рабочих мест и их зарплат (Tchorzewska, 2024). Нидерланды характеризуются высоким уровнем экологической сознательности инвесторов и стремлением к строгому соответствию стандартам ЕС, что способствует инновациям в регулировании и развитию новых инструментов устойчивого финансирования (Ermakova and Frolova, 2021).

Все выбранные инструменты входят в топ-15 рейтинга эмитентов зеленых облигаций по версии агентства CBonds за 2024 г. Источником данных стали платформа CBonds, макроэкономические показатели получены из базы данных национальных статистических служб. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения Python. В табл. 1 представлены характеристики финансовых инструментов, выбранных для дальнейшего анализа.

Таблица 1. Характеристики корпоративных облигаций, включенных в анализ

Страна	Испания	
Эмитент и отрасль	Telefonica SA, Связь и телекоммуникация	
Валюта	EUR	
Код	XS2753310825	XS1120892507

Общая информация	Гарантированные, Green bonds, Senior Unsecured, Callable	Senior Unsecured
Дата размещения	17.01.2024	07.10.2014
Дата погашения	24.01.2032	17.10.2029
Купон	3.698%	2,93%
Дюрация	6.72	3.495% MATURITY / 4.96
Страна	Нидерланды	
Эмитент и отрасль	ING Groep, Банки	
Валюта	EUR	
Код	XS2764264789	XS2624977554
Общая информация	Переменная ставка, Green bonds, Senior Unsecured, Callable	Переменная ставка, Senior Unsecured, Callable
Дата размещения	06.02.2024	15.05.2023
Дата погашения	12.02.2035	23.05.2034
Купон	4.00%	4.75%
Дюрация	8.151	7.563
Страна	Германия	
Эмитент и отрасль	ZF Friedrichshafen, Производство автотранспорта	
Валюта	EUR	
Код	XS2681541327	XS2010039894
Общая информация	Гарантированные, Green bonds, Senior Unsecured, Callable	Гарантированные, Senior Unsecured, Callable
Дата размещения	06.09.2023	14.10.2019
Дата погашения	13.03.2029	23.10.2029
Купон	6.13%	3.00%
Дюрация	4.25	4.95

Выбор независимых переменных для эконометрической модели обусловлен необходимостью учета ключевых факторов ценообразования долговых инструментов, выявленных в эмпирических исследованиях о наличии или отсутствии гриниума (Grishunin et al., 2023). Bid-ask спред включен в качестве показателя ликвидности, так как результаты исследования свидетельствуют о более низких спредах зеленых облигаций по сравнению с обыкновенными аналогами, что может объяснять формирование отрицательной премии (Ivashkovskaya and Mikhaïlova, 2020). Переменная, характеризующая количество лет до погашения, учитывает временную структуру процентных ставок и риск, что коррелирует с показателями ликвидности (Tomczak, 2024).

В качестве макроэкономических рисков использованы инфляция и доходность 10-летних гособлигаций, отражающие инфляционный риск и безрисковую ставку как базовый элемент ценообразования (Tomczak, 2024; Grishunin et al., 2023). Индексы волатильности DAX, AEX и IBEX включены для измерения систематического риска, поскольку волатильность фондового рынка служит индикатором общей рыночной нестабильности (Grishunin et al., 2023).

Таким образом, в качестве результирующих показателей были выбраны Доходность к погашению (Германия, Испания) и Доходность к оферте call/put (Нидерланды), данные содержат ежедневные значения классических и зеленых облигаций. Для построения регрессионной модели, объясняющей доходность зеленых и классических облигаций были выбраны следующие факторы: Bid-ask спред, количество лет до погашения, инфляция в стране-эмитенте, доходность 10-летних государственных облигаций, волатильность рынка или основного фондового индекса страны. Описание факторов представлено в табл. 2.

Таблица 2. Факторы регрессионной модели

Фактор	Обозначение	Описание	Единица измерения
<i>Зависимые переменные</i>			
YTM	YTM _i	Доходность к погашению <i>i</i> -й классической облигации	Проценты
Green YTM	GRYTM _i	Доходность к погашению <i>i</i> -й зеленой облигации	Проценты
<i>Независимые переменные</i>			
Bid-ask спред	BAS	Разница между ценой спроса и ценой предложения	Базисные пункты
Лет до погашения	YEARS	Срок, оставшийся до погашения по выпуску	Количество лет
Инфляция	I	Уровень инфляции потребительских цен	Проценты
Доходность 10-летних государственных облигаций	BY	Показатель безрисковой ставки на финансовом рынке	Проценты
Индекс волатильности DAX	DAX	Среднее изменение цен индекса фондового рынка Германии	Стандартное отклонение доходностей
Индекс волатильности AEX	AEX	Среднее изменение цен индекса фондового рынка Нидерландов	Стандартное отклонение доходностей
Индекс волатильности IBEX	IBEX	Среднее изменение цен индекса фондового рынка Испании	Стандартное отклонение доходностей

4. Результаты

Первоначальное сравнение зеленых и классических облигаций показало существенные различия в их характеристиках, что послужило основой для дальнейшего углубленного анализа.

На рис. 1 представлены результаты сравнительного анализа распределения доходности двух типов облигаций с использованием диаграмм размаха (box plot). Визуальный анализ позволяет констатировать, что доходность к погашению (annually compounded yield to maturity) и доходность к оферте call/put зеленых облигаций ниже, чем у их классических аналогов. Однако следует отметить более высокую дисперсию экстремальных значений доходности зеленых облигаций, что может свидетельствовать о большей неопределенности в их оценке и потенциальной возможности получения как более высокой, так и более низкой отдачи по сравнению с традиционными инструментами.

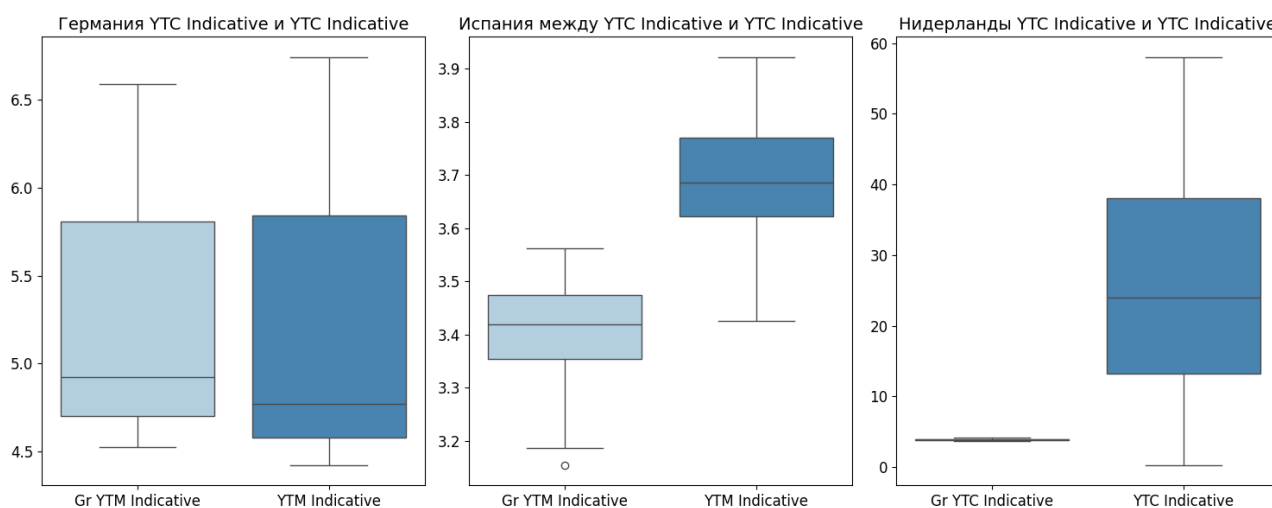


Рисунок 1. Предварительное сравнение доходности зеленых и обычных облигаций

Анализ показателей ликвидности выявил существенные различия в характеристиках Bid-ask спреда. Распределение спреда зеленых облигаций демонстрирует более широкий разброс значений при сопоставимых медианных показателях для немецких и испанских эмитентов. Важно, что средние значения Bid-ask спреда у облигаций Германии и Испании находятся примерно на одном уровне, несмотря на более широкий спред у зеленых облигаций. Это может указывать на то, что факторы, влияющие на неопределенность цены, отличаются в зависимости от страны эмиссии и типа облигаций.

4.1. Анализ наличия гриниума в облигациях эмитентов Испании

На первом этапе детального анализа была исследована корреляционная зависимость между доходностью зеленых и классических облигаций, выпущенных в Испании. Результаты анализа показали высокую степень схожести изменений доходности этих двух типов ценных бумаг (рис. 2). Таким образом, доходность зеленых облигаций движется в том же направлении, что и доходность классических облигаций, хотя и на более низком уровне.

Такая тесная корреляция, наблюдаемая на фоне более низкой доходности зеленых облигаций, позволяет предположить наличие гриниума. Так как предварительный анализ показал, что доходность зеленых облигаций ниже, чем доходность классических облигаций, тесная степень корреляции указывает на наличие фактора, влияющего на движение доходности зеленых облигаций в том же направлении, что и доходность классических облигаций.

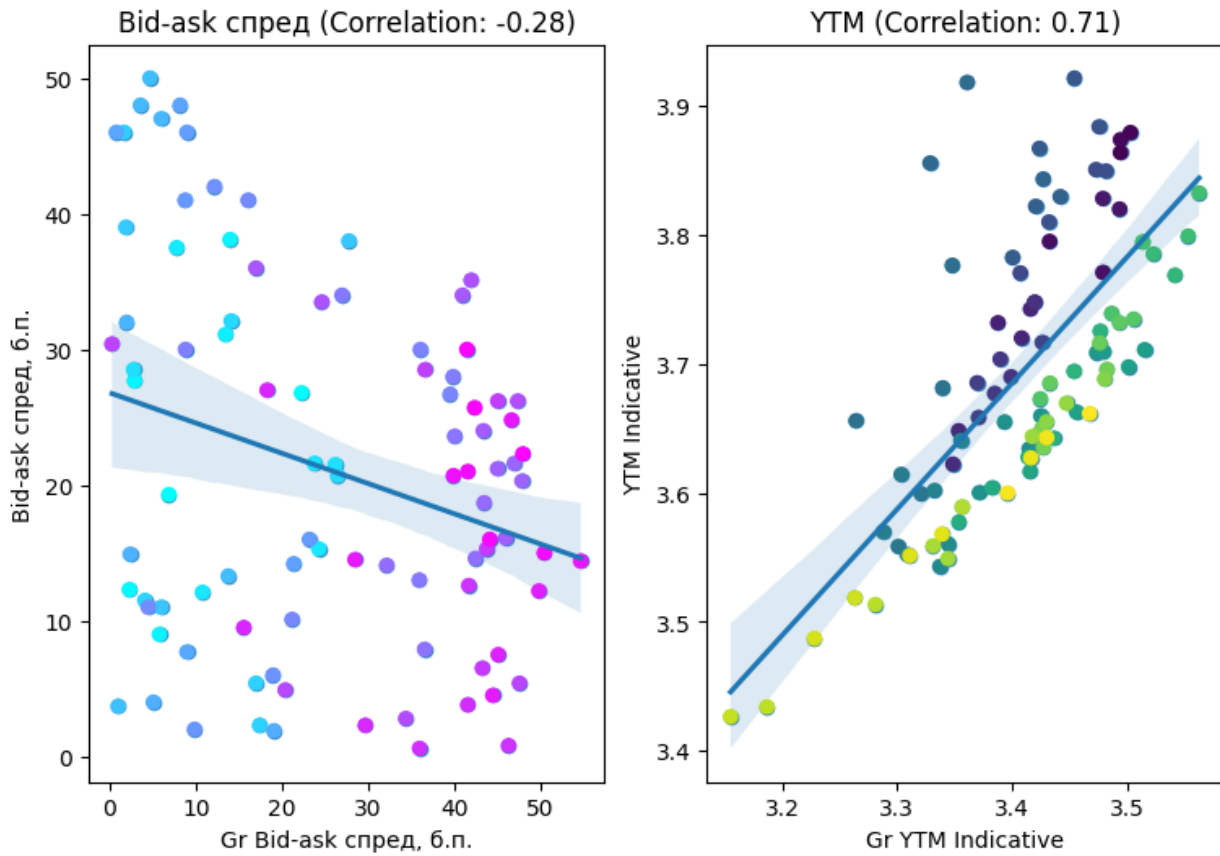


Рисунок 2. Корреляционный анализ облигаций

Регрессионный анализ показал, что наибольшее влияние на облигацию XS2753310825 оказывает инфляция в стране, положительное влияние оказывает только фактор доходности 10-летних государственных облигаций.

Для оценки качества модели были рассчитаны среднеквадратичная ошибка, средняя абсолютная ошибка, коэффициент детерминации и F -статистика. Для оценки статистической значимости факторов проведен анализ P -value, t -value. F -расчетное (466.26) больше F -критического (2.31), следовательно, модель значима. Обобщенные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Анализ коэффициентов регрессии

0		coef.	std err	t	$P > t $	[0.025	0.975]
1	BAS	-0.003	0.048	2.378	0.020	0.019	0.208
2	YEARS	-2.088	0.038	0.670	0.505	-0.050	0.102
3	I	-33.414	0.044	-3.879	0.000	-0.256	-0.082
4	BY	1.964	0.059	16.429	0.000	0.854	1.089
5	IBEX	-0.253	0.047	4.010	0.000	0.094	0.280

Таким образом, статистически значимыми являются все показатели, исключая срок до погашения облигации. Для сравнения степени влияния выбранных факторов на зеленые облигации была построена регрессионная модель для доходности зеленой облигации.

Регрессионный анализ показал, что наибольшее влияние на зеленую облигацию, также как и на обыкновенную, оказывает инфляция в стране. Положительное влияние оказывает фактор доходности 10-летних государственных облигаций, однако в случае доходности зеленых облигаций степень влияния выше. Оценка качества модели и коэффициентов регрессии проводится по тем же критериям, что и для классической регрессии облигаций, включая анализ стандартных ошибок, коэффициента детерминации и других статистических показателей. Тест F -статистики показал, что данная модель значима (F -расчетное $>$ F -критического, $259.48 > 2.31$). Обобщенные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Анализ коэффициентов регрессии для зеленой облигации

0		coef.	std err	<i>t</i>	$P > t$	[0.025	0.975]
1	BAS	0.004	0.074	4.198	0.000	0.163	0.456
2	YEARS	-1.159	0.083	-0.432	0.667	-0.200	0.128
3	I	-36.059	0.053	-4.329	0.000	-0.336	-0.125
4	BY	2.079	0.074	12.196	0.000	0.760	1.057
5	IBEX	-0.200	0.049	1.609	0.111	-0.019	0.178

Таким образом, статистически значимыми являются все показатели, за исключением срока до погашения облигации. Такой же результат был получен при анализе коэффициентов регрессии для обыкновенной облигации.

4.2. Анализ наличия гриниума в облигациях эмитентов Нидерландов

На данном этапе исследования был осуществлен комплексный анализ корреляционных взаимосвязей между доходностью зеленых и традиционных облигаций, выпущенных нидерландским эмитентом. Результаты эмпирического исследования демонстрируют низкую корреляцию между показателями доходности анализируемых финансовых инструментов (рис. 4).

Выявленные закономерности позволяют констатировать меньшую величину гриниума в облигационном портфеле ING Groep (Нидерланды) в сравнении с аналогичными показателями облигаций Telefonica SA (Испания). Данный факт свидетельствует о специфических особенностях формирования ценовых характеристик зеленых облигаций в зависимости от страновой принадлежности эмитента.

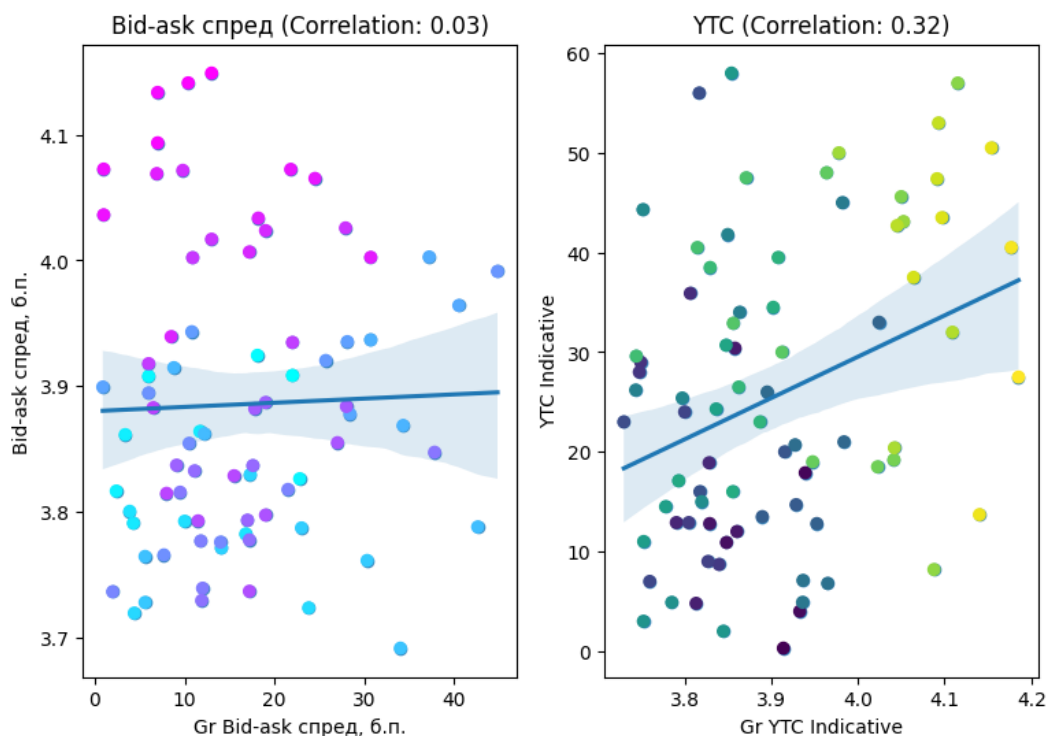


Рисунок 3. Корреляционный анализ облигаций

Наибольшее положительное влияние оказывает уровень инфляции, наибольший отрицательный эффект – ставка 10-летних государственных облигаций. Для данной модели также были рассчитаны метрики качества, включающие среднеквадратичную ошибку, среднюю абсолютную ошибку, коэффициент детерминации. Так как, F -расчетное (127.71) больше F -критического (2.49), можно сделать вывод о статистической значимости модели. Обобщенные результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Анализ коэффициентов регрессии

0		coef.	std err	t	$P > t $	[0.025	0.975]
1	BAS	0.216	0.173	-1.746	0.085	-0.646	0.043
2	YEARS	1.188	0.121	7.443	0.000	0.661	1.144
3	I	2.861	0.081	-0.148	0.882	-0.173	0.149
4	BY	0.314	0.094	5.604	0.000	0.341	0.717
5	AEX	0.001	0.000	-2.906	0.005	-0.000	-0.000

Можно сделать вывод о том, что количество лет до погашения, доходность 10-летних облигаций и волатильность основного биржевого индекса являются статистически значимыми факторами. Однако спред и инфляция незначительно влияют на результаты моделирования и не могут являться статистически значимыми.

Для сравнения степени влияния выбранных факторов на зеленые облигации была построена регрессионная модель для доходности зеленой облигации. В отличие от классических облигаций, на доходность зеленых облигаций Bid-ask спред и доходность государственных облигаций оказывают противоположное влияние. F -статистика показала, что F -расчетное

больше F -критического ($221.15 > 2.49$), следовательно, модель значима. Обобщенные результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6. Анализ коэффициентов регрессии для зеленой облигации

0		coef.	std err	t	$P > t $	[0.025	0.975]
1	BAS	-0.001	0.075	-2.165	0.034	-0.313	-0.013
2	YEARS	2.606	0.066	8.654	0.000	0.442	0.707
3	I	6.479	0.056	2.595	0.011	0.034	0.256
4	BY	2.560	0.065	7.438	0.000	0.353	0.612
5	AEX	-0.004	0.000	6.769	0.000	0.000	0.000

Все факторы, представленные в таблице, являются статистически значимыми, так как P -value каждого из них не превышает установленного ограничения в 0.05. Следовательно, все перечисленные факторы оказывают значительное влияние и могут быть учтены в дальнейших анализах.

4.3. Анализ наличия гриниума в облигациях эмитентов Германии

Также была изучена корреляционная зависимость доходности между зелеными и классическими облигациями, выпущенными в Германии. Результаты анализа показали высокую степень схожести изменений доходности этих двух типов ценных бумаг. Доходность зеленых облигаций движется в том же направлении, что и доходность классических облигаций, при этом оставаясь на более низком уровне.

Высокая корреляция между доходностью зеленых и классических облигаций, наблюдаемая на фоне более низкой доходности зеленых облигаций, может свидетельствовать о наличии гриниума. Однако исходный спред между доходностью зеленых и классических облигаций был незначительным, что не позволяет однозначно утверждать о наличии гриниума по доходности.

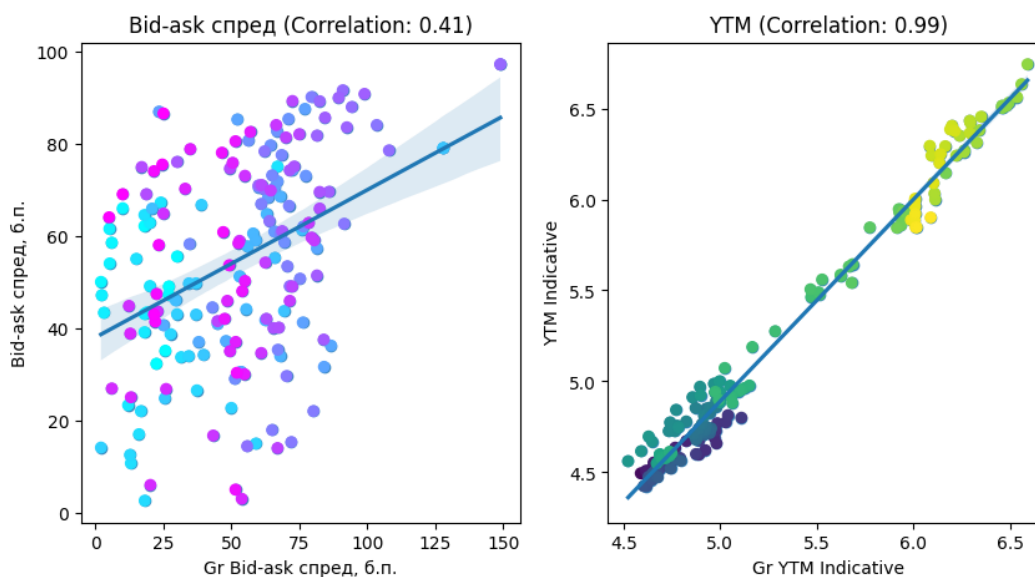


Рисунок 4. Корреляционный анализ облигаций

Наибольшее положительное влияние оказывает срок до погашения, наибольшее отрицательное – инфляция. Незначительное положительное влияние оказывают также факторы волатильности DAX и Bid-ask спреда. Сравнение F -расчетного с F -критическим свидетельствует о статистической значимости модели ($1009.14 > 2.26$). Обобщенные результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7. Анализ коэффициентов регрессии

0		coef	std err	t	$P > t $	[0.025	0.975]
1	BAS	0.000	0.027	-7.892	0.000	-0.262	-0.157
2	YEARS	1.023	0.098	4.870	0.000	0.283	0.668
3	I	-0.325	0.086	3.469	0.001	0.128	0.467
4	BY	0.417	0.042	7.762	0.000	0.242	0.406
5	DAX	0.024	0.044	2.274	0.024	0.013	0.188

Все выбранные факторы являются статистически значимыми и могут быть использованы для анализа. Для сравнения степени влияния выбранных факторов на зеленые облигации была построена регрессионная модель для доходности зеленой облигации.

Можно сделать вывод о том, что выбранные факторы оказывают влияние примерно в той же степени, что и в случае классических облигаций. Метрика качества моделей представлена на графике. F -статистика показала, что модель является статистически значимой, так как значение F -расчетного превышает F -критическое, $1166.58 > 2.26$. Обобщенные результаты представлены в табл. 8.

Таблица 8. Анализ коэффициентов регрессии зеленых облигаций

0		coef.	std err	t	$P > t $	[0.025	0.975]
1	BAS	-0.000	0.034	-8.237	0.000	-0.347	-0.213
2	YEARS	0.997	0.100	8.346	0.000	0.635	1.027
3	I	-3.440	0.087	-1.800	0.074	-0.326	0.015
4	BY	0.434	0.041	7.270	0.000	0.220	0.383
5	DAX	0.260	0.044	4.772	0.000	0.124	0.299

В отличие от классических облигаций, волатильность DAX является статистически значимым показателем, инфляция – статистически не значима. Таким образом, наибольший гриниум можно определить в облигациях компании Telefonica SA (Испания).

Факторы, выбранные для построения модели, в разной степени описывают доходность облигаций. Доходность зеленых облигаций Германии и Нидерландов в равной степени характеризуют данный показатель (86%). В испанской зеленой облигации процент описанной дисперсии значительно ниже, однако находится в допустимых границах. В регрессионных

моделях Bid-ask спред оказывает противоположное влияние на классические и зеленые облигации.

Для оценки качества моделей были рассчитаны среднеквадратичная ошибка (MSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2) и F -статистика. Также проводился анализ P -value и t -value для оценки статистической значимости факторов. Все модели оказались статистически значимыми (F -расчетное $>$ F -критическое).

Результаты оценки точности моделей показывают разную степень достоверности при прогнозировании цен на облигации в разных странах. Уравнение регрессии для классической облигации в Испании имеет самый высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0.82$), что указывает на его наилучшую способность объяснять изменения цен на облигации. Модель для нидерландской классической облигации имеет наибольшую стандартную ошибку (MSE = 0.044), что свидетельствует о меньшей точности ее прогнозов по сравнению с другими моделями. Сравнение моделей для «зеленых» облигаций с классическими облигациями показывает, что «зеленые» облигации, как правило, имеют более высокие значения описанной дисперсии, что может указывать на большую стабильность цен.

5. Обсуждение

Проведенное исследование позволило выявить ряд важных закономерностей, касающихся детерминант доходности зеленых облигаций на европейском рынке. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии макроэкономических факторов на доходность как зеленых, так и классических облигаций, что согласуется с выводами более ранних исследований (Broadstock and Cheng, 2019). В частности, подтверждена значимая роль инфляции и безрисковой ставки в форме доходности 10-летних государственных облигаций.

Регрессионный анализ позволил выявить ключевые факторы, влияющие на доходность зеленых облигаций, и межстрановые особенности в проявлении гриниума. В частности, для облигаций, выпущенных компанией в Испании, было установлено, что инфляция оказывает наиболее существенное влияние. Кроме того, доходность 10-летних государственных облигаций также оказывает положительное влияние на доходность как классической, так и зеленой облигации. Наибольшая величина премии наблюдается на испанском рынке, что может быть связано с особенностями национального регулирования и структурой инвесторов. Так, исследователи, проводящие анализ на примере зеленых корпоративных облигаций ЕС, связывают высокий гриниум с активной поддержкой устойчивого финансирования на государственном уровне, а также с высокой долей институциональных инвесторов, которые поддерживают ESG-трансформацию бизнес-процессов (Grishunin et al., 2023). Жесткие стандарты ЕС и национальные инициативы, обязательная сертификация также являются ключевыми факторами роста спроса на данный тип финансовых инструментов (Zhou et al., 2024).

Для немецких и нидерландских эмитентов характерен менее выраженный эффект, что согласуется с результатами исследований, отмечающих зависимость величины гриниума от уровня развития рынка устойчивого финансирования (Flammer, 2021). Результаты исследований для немецкого и нидерландского рынков часто не позволяют выявить статистически значимых доказательств устойчивого эффекта гриниума, так как наблюдаемый спред в доходности между зелеными и обыкновенными облигациями был минимальным и не позволял сделать однозначный вывод о наличии премии за «зеленость» (Grishunin and Bukreeva, 2022).

Важным результатом является подтверждение гипотезы о чувствительности зеленых облигаций к макроэкономическим факторам. Как и в (Pietsch and Salakhova, 2022), данное исследование демонстрирует, что зеленые инструменты сохраняют зависимость от традиционных рыночных индикаторов, несмотря на наличие специфической премии.

Исследование имеет несколько ограничений. Во-первых, методология оценки гриниума через сравнение доходности и корреляционный анализ может не полностью учитывать все факторы риска. Во-вторых, ограниченный объем выборки и короткий временной горизонт наблюдений не позволяют сделать выводы о долгосрочной устойчивости выявленных эффектов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в расширении выборки за счет включения эмитентов из других стран ЕС, в применении более сложных эконометрических моделей, а также в анализе влияния качества верификации зеленого статуса облигаций на величину премии.

6. Заключение

Выпуск зеленых облигаций становится распространенным способом следования зеленой повестке компаний разных стран. Бизнес становится одним из ключевых игроков в секторе устойчивого развития на фондовом рынке, особенно как эмитент зеленых облигаций, что способствует привлечению инвестиций для реализации экологических проектов, а также позволяет показать приверженность компании к устойчивым практикам.

Доходность зеленых инструментов зависит от институциональной среды страны, трендов на фондовом рынке, предпочтений инвесторов и макроэкономических факторов. Наличие эффекта гриниум означает интерес инвесторов к тематике устойчивого развития, что в долгосрочной перспективе увеличивает стоимость компании.

При планировании стратегии необходимо учитывать влияние факторов не только на доходность классических облигаций, но и на зеленую составляющую фондового рынка, так как наблюдается повышение спроса инвесторов на облигации с аналогичными характеристиками даже при условии более низкой доходности в пользу устойчивой параллели.

Наличие гриниума в разной степени подтверждается как на первичном, так и на вторичном рынках. Основной причиной такого явления считается стремление к более низкой стоимости заимствования и увеличения капитализации компании в долгосрочной перспективе.

Гриниум является важным фактором, который стимулирует развитие рынка зеленых финансовых инструментов и способствует привлечению инвестиций в экологические проекты. Несмотря на методологические ограничения, исследования подтверждают наличие «зеленой премии», демонстрируя высокую востребованность экологически ответственных инвестиций. Дальнейшие исследования, направленные на более глубокое понимание «зеленой премии» и ее взаимосвязи с макроэкономическими факторами, играют значимую роль для развития устойчивого финансирования и достижения целей устойчивого развития.

7. Благодарности

Статья опубликована в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

Список литературы

- Alessi, L., Ossola, E., Panzica, R., 2023. When do investors go green? Evidence from a time-varying asset-pricing model. *International Review of Financial Analysis* 90, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102898>
- Broadstock, D.C., Cheng, L.T.W., 2019. Time-varying relation between black and green bond price benchmarks: Macroeconomic determinants for the first decade. *Finance Research Letters* 29, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.02.006>
- Ermakova, E.P., Frolova, E.E., 2021. Combating Climate Change by Finance – The Experience of the Netherlands, in: *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap (ISC 2019)*. Springer, Champ, pp. 1794–1806. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69415-9_198
- Flammer, C., 2021. Corporate Green Bonds. *Journal of Financial Economics* 142 (2), 499–516. <https://doi.org/10.1016/j.jfneco.2021.01.010>
- Grishunin, S., Bukreeva, A., 2022. In Search of Greenium. Analysis of Yields in the European Green Bond Markets. *Procedia Computer Science* 214, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.161>
- Grishunin, S., Bukreeva, A., Suloeva, S., Burova, E., 2023. Analysis of Yields and Their Determinants in the European Corporate Green Bond Market. *Risks* 11 (1), 14. <https://doi.org/10.3390/risks11010014>
- Grishunin, S., Burova, E., Suloeva, S., Pishchalkin, D., Isroilov, B., Doliev, S., 2024. Greenium and Its Determinants at Various Phases of Life Cycle of European Green Bond Market. *E3S Web of Conferences* 574, 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457403005>
- Hu, X., Zhu, B., Lin, R., Li, X., Zeng, L., Zhou, S., 2024. How does greenness translate into greenium? Evidence from China's green bonds. *Energy Economics* 133, 107511. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107511>
- Huang, C., Dekker, D., Christopoulos, D., 2023. Rethinking greenium: a quadratic function of yield spread. *Finance Research Letters* 54, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103710>
- Ivashkovskaya, I., Mikhaylova, A., 2020. Do Investors Pay Yield Premiums on Green Bonds? *Journal of Corporate Finance Research* 14 (2), 7–21. <https://doi.org/10.17323/j.jcfr.2073-0438.14.2.2020.7-21>
- Lau, P., Sze, A., Wan, W., Wong, A., 2020. The Economics of the Greenium: How Much is the World Willing to Pay to Save the Earth? *Environmental and Resource Economics* 81, 379–408. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00630-5>
- Liberati, D., Marinelli, G., 2025. Was Covid-19 a wake-up call on climate risks? Evidence from the greenium. *Empirical Economics* 68, 2549–2585. <https://doi.org/10.1007/s00181-025-02711-6>
- Löffler, K.U., Petreski, A., Stephan, A., 2021. Drivers of green bond issuance and new evidence on the “greenium”. *Eurasian Economic Review* 11 (1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s40822-020-00165-y>
- Luke, B.D., Zota, C., 2021. From Grass to Mass: An Index-Based Approach to Measuring Greenium in Green Bonds. *S&P Dow Jones Indices–Research*. MacAskill, S., Roca, E., Liu, B., Stewart, R.A., Sahin, O., 2021. Is there a green premium in the green bond market? Systematic literature review revealing premium determinants. *Journal of Cleaner Production* 280 (2), 124491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124491>
- Meyer, S., Henide, K., 2023. Searching for ‘Greenium’: Evidence of a green pricing premium in the secondary Euro-denominated investment grade corporate bond market? *IHS Markit*.
- Mrkajic, B., Murtinu, S., Scalera, V.G., 2019. Is green the new gold? Venture capital and green entrepreneurship. *Small Business Economics* 52 (4), 929–950. <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9943-x>
- Mudretsov, A., Prudnikova, A., 2022. Green finance development: global trends and prospects. *Market economy problems*. <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2022-4-102-111>
- Nurvita, T., Achsan, N. A., Anggraeni, L., Malahayati, M., Novianti, T., 2024. Exploring Greenium and the Determinants of Green Bond Performance in Asia. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 26 (04), 2450015. <https://doi.org/10.1142/S1464333224500157>
- Pietsch, A., Salakhova, D., 2022. Pricing of green bonds: drivers and dynamics of the greenium. *ECB Working Paper Series* 2728
- Pirgaip, B., Arslan-Ayaydin, O., 2024. Exploring the greenium in the green Sukuk universe: evidence from the primary market. *International Journal of Islamic and Middle Eastern Finance and Management* 17 (3), 423–440. <https://doi.org/10.1108/imefm-05-2023-0186>
- Tchorzewska, K.B., 2024. A Lost Opportunity? Environmental Investment Tax Incentive and Energy Efficient Technologies. *Environmental and Resource Economics* 87, 3301–3333. <https://doi.org/10.1007/s10640-024-00916-4>
- Tomczak, K., 2024. Sovereign Green Bond Market: Drivers of Yields and Liquidity. *International Journal of Financial Studies* 12 (2), 48. <https://doi.org/10.3390/ijfs12020048>
- Wang, J., Chen, X., Li, X., Yu, J., Zhong, R., 2020. The market reaction to green bond issuance: Evidence from China. *Pacific-Basin Finance Journal* 60, 101294. <https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2020.101294>
- Zhao, D., Wang, Y., Fang, Y., 2024. Greenium and public climate concerns: Evidence from China. *Finance Research Letters* 69 (A), 106091. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106091>
- Zhou, P., Jin, S., Mazouz, K., Ding, W., 2024. Choices and Effects of Different Green Labels in the EU Bond Market. *Journal of Business Ethics* 200, 207–229. <https://doi.org/10.1007/s10551-024-05847-0>
- Zhou, X., Cui, Y., 2019. Green Bonds, Corporate Performance, and Corporate Social Responsibility. *Sustainability* 11 (23), 6881. <https://doi.org/10.3390/su11236881>

References

- Alessi, L., Ossola, E., Panzica, R., 2023. When do investors go green? Evidence from a time-varying asset-pricing model. *International Review of Financial Analysis* 90, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102898>
- Broadstock, D.C., Cheng, L.T.W., 2019. Time-varying relation between black and green bond price benchmarks: Macroeconomic determinants for the first decade. *Finance Research Letters* 29, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.02.006>

- Ermakova, E.P., Frolova, E.E., 2021. Combating Climate Change by Finance – The Experience of the Netherlands, in: *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap* (ISC 2019). Springer, Champ, pp. 1794–1806. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69415-9_198
- Flammer, C., 2021. Corporate Green Bonds. *Journal of Financial Economics* 142 (2), 499–516. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2021.01.010>
- Grishunin, S., Bukreeva, A., 2022. In Search of Greenium. Analysis of Yields in the European Green Bond Markets. *Procedia Computer Science* 214, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.161>
- Grishunin, S., Bukreeva, A., Suloeva, S., Burova, E., 2023. Analysis of Yields and Their Determinants in the European Corporate Green Bond Market. *Risks* 11 (1), 14. <https://doi.org/10.3390/risks11010014>
- Grishunin, S., Burova, E., Suloeva, S., Pishchalkin, D., Isroilov, B., Doliev, S., 2024. Greenium and Its Determinants at Various Phases of Life Cycle of European Green Bond Market. *E3S Web of Conferences* 574, 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457403005>
- Hu, X., Zhu, B., Lin, R., Li, X., Zeng, L., Zhou, S., 2024. How does greenness translate into greenium? Evidence from China's green bonds. *Energy Economics* 133, 107511. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107511>
- Huang, C., Dekker, D., Christopoulos, D., 2023. Rethinking greenium: a quadratic function of yield spread. *Finance Research Letters* 54, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103710>
- Ivashkovskaya, I., Mikhaylova, A., 2020. Do Investors Pay Yield Premiums on Green Bonds? *Journal of Corporate Finance Research* 14 (2), 7–21. <https://doi.org/10.17323/j.jcfr.2073-0438.14.2.2020.7-21>
- Lau, P., Sze, A., Wan, W., Wong, A., 2020. The Economics of the Greenium: How Much is the World Willing to Pay to Save the Earth? *Environmental and Resource Economics* 81, 379–408. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00630-5>
- Liberati, D., Marinelli, G., 2025. Was Covid-19 a wake-up call on climate risks? Evidence from the greenium. *Empirical Economics* 68, 2549–2585. <https://doi.org/10.1007/s00181-025-02711-6>
- Löffler, K.U., Petreski, A., Stephan, A., 2021. Drivers of green bond issuance and new evidence on the “greenium”. *Eurasian Economic Review* 11 (1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s40822-020-00165-y>
- Luke, B.D., Zota, C., 2021. From Grass to Mass: An Index-Based Approach to Measuring Greenium in Green Bonds. *S&P Dow Jones Indices–Research*. MacAskill, S., Roca, E., Liu, B., Stewart, R.A., Sahin, O., 2021. Is there a green premium in the green bond market? Systematic literature review revealing premium determinants. *Journal of Cleaner Production* 280 (2), 124491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124491>
- Meyer, S., Henide, K., 2023. Searching for ‘Greenium’: Evidence of a green pricing premium in the secondary Euro-denominated investment grade corporate bond market? *IHS Markit*.
- Mrkajic, B., Murtinu, S., Scalera, V.G., 2019. Is green the new gold? Venture capital and green entrepreneurship. *Small Business Economics* 52 (4), 929–950. <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9943-x>
- Mudretsov, A., Prudnikova, A., 2022. Green finance development: global trends and prospects. *Market economy problems*. <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2022-4-102-111>
- Nurvita, T., Achsan, N. A., Anggraeni, L., Malahayati, M., Novianti, T., 2024. Exploring Greenium and the Determinants of Green Bond Performance in Asia. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 26 (04), 2450015. <https://doi.org/10.1142/S1464333224500157>
- Pietsch, A., Salakhova, D., 2022. Pricing of green bonds: drivers and dynamics of the greenium. *ECB Working Paper Series* 2728
- Pirgaip, B., Arslan-Ayaydin, O., 2024. Exploring the greenium in the green Sukuk universe: evidence from the primary market. *International Journal of Islamic and Middle Eastern Finance and Management* 17 (3), 423–440. <https://doi.org/10.1108/imefm-05-2023-0186>
- Tchorzewska, K.B., 2024. A Lost Opportunity? Environmental Investment Tax Incentive and Energy Efficient Technologies. *Environmental and Resource Economics* 87, 3301–3333. <https://doi.org/10.1007/s10640-024-00916-4>
- Tomczak, K., 2024. Sovereign Green Bond Market: Drivers of Yields and Liquidity. *International Journal of Financial Studies* 12 (2), 48. <https://doi.org/10.3390/ijfs12020048>
- Wang, J., Chen, X., Li, X., Yu, J., Zhong, R., 2020. The market reaction to green bond issuance: Evidence from China. *Pacific-Basin Finance Journal* 60, 101294. <https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2020.101294>
- Zhao, D., Wang, Y., Fang, Y., 2024. Greenium and public climate concerns: Evidence from China. *Finance Research Letters* 69 (A), 106091. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106091>
- Zhou, P., Jin, S., Mazouz, K., Ding, W., 2024. Choices and Effects of Different Green Labels in the EU Bond Market. *Journal of Business Ethics* 200, 207–229. <https://doi.org/10.1007/s10551-024-05847-0>
- Zhou, X., Cui, Y., 2019. Green Bonds, Corporate Performance, and Corporate Social Responsibility. *Sustainability* 11 (23), 6881. <https://doi.org/10.3390/su11236881>

Статья поступила в редакцию 14.05.2025, одобрена после рецензирования 23.05.2025, принята к публикации 02.06.2025.

The article was submitted 14.05.2025, approved after reviewing 23.05.2025, accepted for publication 02.06.2025.

Информация об авторах

1. Светлана Гутман, кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-1098-3915>, sgutman@spbstu.ru
2. Майя Егорова, специалист, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0005-7026-0304>, egorova_mm@spbstu.ru
3. Новикова Екатерина, руководитель отдела развития корпоративных практик и проектов, Департамент устойчивого развития ПАО «СПБ Биржа». e.novikova@spbexchange.ru

About the authors:

1. Svetlana Gutman, Ph.D in Economics, Associate Professor of Graduate School of Industrial Economics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-1098-3915>, sgutman@spbstu.ru

2. Maya Egorova, specialist, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0005-7026-0304>, egorova_mm@spbstu.ru
Ekaterina Novikova, Head of Corporate Practice and Project Development Department, Department of Sustainable Development of PJSC St. Petersburg Stock Exchange, Moscow, Russian Federation. e.novikova@spbexchange.ru

Научная статья

УДК 332.135

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.5>

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРОВИНЦИЙ ТАИЛАНДА

Никита Шариков^{1*}, Полина Полякова², Арсений Кудрявцев¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, sharikov.ni@edu.spbstu.ru, arseny.kudryavtzev@yandex.ru

²ООО «Газпромнефть Информационно-Технологический оператор», Санкт-Петербург, Россия, polyakova_p00@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: sharikov.ni@edu.spbstu.ru

Аннотация

Исследование посвящено оценке пространственной дифференциации социально-экономического развития провинций Таиланда в условиях реализации экономической стратегии развития страны. Научная проблема заключается в недостаточной разработанности эмпирических методов выявления кластерной структуры регионов с учетом демографических, отраслевых и институциональных факторов. Целью работы являются выявление закономерностей распределения экономической активности и формирование типологии провинций для обоснования региональной политики. В качестве исходных данных использованы показатели ВРП на душу населения, миграции, инвестиций, использования земельных угодий и туризма за 2010–2021 гг. Проведены расчеты коэффициента Уильямсона, подтвердившие рост межпровинциального неравенства. Кластеризация осуществлялась методами K-means, иерархической агломерации и DBSCAN с использованием Python и библиотеки scikit-learn. Оптимальные результаты продемонстрировал алгоритм K-means при трех и четырех кластерах, где Бангкок выделен в отдельную группу. Получены три устойчивые типологии: индустриальные центры Центрального Таиланда, аграрные провинции Северного и Северо-Восточного Таиланда, туристско-инфраструктурный Южный Таиланд. Результаты показали признаки β -конвергенции в ряде переходных провинций и подтвердили сохраняющуюся пространственную поляризацию. На основе анализа предложены адресные меры: модернизация агропромышленности, стимулирование инновационной активности, развитие туристической инфраструктуры. Выводы подчеркивают необходимость дифференцированной региональной политики и демонстрируют практическую значимость кластерного анализа для реализации стратегии «Таиланд 4.0».

Ключевые слова: кластерный анализ, региональное экономическое развитие, пространственная дифференциация, социально-экономические факторы, провинции Таиланда.

Цитирование: Шариков, Н., Полякова, П., Кудрявцев, А., Кластерный Анализ Экономического Развития Провинций Таиланда. Sustainable Development and Engineering Economics 2, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.5>




Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Шариков Н., Полякова П., Кудрявцев А., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.5>

CLUSTER ANALYSIS OF THE ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE PROVINCES OF THAILAND

Nikita Sharikov^{1*}, Polina Poliakova², Arseny Kudryavtsev¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, sharikov.ni@edu.spbstu.ru, arseny.kudryavtzev@yandex.ru

²LLC Gazpromneft Information Technology Operator, St. Petersburg, Russian Federation, polyakova_p00@mail.ru

*Corresponding author: sharikov.ni@edu.spbstu.ru

Abstract

The article addresses the issue of spatial differentiation in the socio-economic development of Thailand's provinces in the context of the national "Thailand 4.0" strategy. The research problem arises from the limited empirical evaluation of regional heterogeneity that integrates demographic, sectoral, and institutional dimensions. The objective is to identify structural patterns of provincial development and to propose a typology that may serve as a basis for differentiated regional policy. The study relies on provincial-level indicators for 2010–2021, including per capita gross regional product, labor migration, industrial investment, land use, and inbound tourism. The Williamson coefficient was applied to quantify inequality, revealing its growth over the past decade. Clustering was performed using k-means, hierarchical agglomerative methods, and DBSCAN in Python with scikit-learn. The k-means algorithm with three and four clusters produced the most robust results, isolating Bangkok as a distinct cluster. Three persistent groupings were identified: industrial centers in the central region, agricultural provinces of the northern and northeastern areas, and tourism-driven provinces in the south. The analysis also revealed β -convergence processes in several transitional provinces, suggesting gradual alignment of development trajectories. Policy recommendations emphasize modernization of agriculture, innovation support for industrial centers, and infrastructure projects in tourism-intensive provinces. The findings confirm the persistence of spatial polarization and highlight the utility of cluster analysis as a tool for refining Thailand's regional development strategy.

Keywords: cluster analysis, regional economic development, spatial differentiation, socio-economic factors, provinces of Thailand.

Citation: Sharikov, N., Poliakova, A. Kudryavtsev, A., 2025. Cluster analysis of the economic development of the provinces of Thailand. *Sustainable Development and Engineering Economics* 2, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.2.5>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Sharikov, N., Poliakova, A. Kudryavtsev, A., 2025. Published by Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University.

1. Введение

Объектом настоящего исследования выступают провинции Таиланда. В условиях ускоряющихся трансформаций мировой экономики и роста значимости региональных факторов устойчивого развития особое внимание приобретает изучение внутристрановой дифференциации. Таиланд представляет особый интерес как развивающееся государство Юго-Восточной Азии, демонстрирующее высокие темпы экономического развития при наличии выраженной территориальной неоднородности. В то же время страна реализует государственную стратегию «Таиланд 4.0», ориентированную на цифровую трансформацию экономики, снижение зависимости от иностранного капитала и активное участие в интеграционных процессах региона АСЕАН. В этих условиях особенно важно оценить влияние пространственных различий на экономическое развитие страны.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью выявления факторов, определяющих экономическое развитие на субнациональном уровне, с учетом высокой региональной дифференциации, характерной как для Таиланда, так и для ряда других стран, включая Россию. Несмотря на достигнутые макроэкономические успехи, в Таиланде сохраняются значительные различия в уровне развития провинций, что требует пространственных научно обоснованных подходов к оценке и прогнозированию регионального развития (Pastpipatkul and Ko, 2025; Srisaringkarn and Aruga, 2025a).

Научная проблема исследования заключается в недостаточной разработанности эмпирической оценки пространственных взаимосвязей регионального экономического развития Таиланда, с учетом их демографической, отраслевой и институциональной специфики. Существующие исследования преимущественно ограничиваются изучением отдельных факторов или применением классических методов эконометрики (Soloviev et al., 2025), что затрудняет выявление реальных детерминант развития и адекватный учет пространственной неоднородности. В результате не формируется целостная картина кластерной структуры провинций, а значит, отсутствует возможность предложить адресные меры региональной политики.

В соответствии с обозначенной проблемой в рамках настоящей работы поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать уровень социально-экономической дифференциации провинций Таиланда.
3. Провести кластеризацию провинций на основе социально-экономических показателей с использованием различных методов кластерного анализа.
4. Сопоставить полученные результаты с традиционными индикаторами регионального развития (ВРП, население и др.).
5. Разработать рекомендации по региональной политике Таиланда с учетом выявленных кластеров и их пространственной специфики.

Цель исследования – выявить и обосновать ключевые закономерности пространственного распределения экономического развития провинций Таиланда с использованием методов кластерного анализа.

Предметом исследования являются пространственная дифференциация социально-экономического развития провинций Таиланда и ее проявления в форме устойчивых кластеров.

Научная новизна исследования заключается в комплексном применении методов кластерного анализа к оценке экономического развития провинций Таиланда на основе многомерных социально-экономических показателей. В отличие от предыдущих работ, исследование учитывает не только макроэкономические и отраслевые различия, но и цифровые, институциональные и экологические факторы. Это позволило сформировать оригинальную кластерную типологию провинций, выявить пространственные паттерны регионального развития и предложить адресные рекомендации для корректировки государственной стратегии «Таиланд 4.0». Полученные результаты вносят вклад в развитие теории и методологии региональной экономики, а также имеют прикладное значение для совершенствования инструментов территориального планирования и региональной политики в странах с высокой неоднородностью развития.

2. Обзор литературы

Экономическое развитие – это долгосрочный процесс достижения экономического процветания всего сообщества за счет взаимодействия экономических и неэкономических факторов (Pelsa and Valina, 2022). Экономическое развитие для повышения благосостояния людей требует увеличения экономического роста за счет факторов производства. При этом использование сугубо факторного подхода при построении экономической политики недостаточно результативно и требует использование более актуальных пространственных подходов при планировании экономического развития.

В настоящее время исследованию влияния различных факторов на экономическое развитие регионов посвящено множество как отечественных (Soloviev et al., 2025), так и зарубежных исследований, что подчеркивает высокую освещенность факторного подхода к изучению регионального развития и необходимость поиска новых более эффективных подходов к моделированию в рассматриваемой области.

Ряд современных исследований демонстрирует, что экономическое развитие на региональном уровне обусловлено не только традиционными макроэкономическими переменными, но и рядом пространственно распределенных факторов, таких как институциональные различия, географическая близость, доступ к инвестициям и уровень инновационной активности. Моделирование экономического роста все чаще опирается на интеграцию пространственной эконометрики, панельных данных и методов машинного обучения (Beketov et al., 2024). Современные работы подтверждают востребованность кластеризации (K-means/K-medoids, иерархические алгоритмы, Affinity Propagation и LISA/Moran's I) для типологизации территорий и выделения «схожих» по развитию групп.

Так, авторы (Tirayalai and Mendez, 2024) выявили наличие пространственной зависимости и процессы региональной конвергенции (σ - и β -конвергенцию доходов на душу населения по 77 провинциям за 1995–2017 гг.) в Таиланде, показав наличие локализованных зон, где экономическое развитие провинций движется по схожим сценариям. Они пользовались инструментами глобальных и локальных индикаторов пространственной ассоциации (Moran's I, LISA). Полученные результаты подтверждают необходимость методов кластеризации для корректной типологизации регионов.

В (Vaňová et al., 2024) с использованием пространственных эконометрических моделей были определены отрасли, которые сильнее всего влияют на средние доходы домохозяйств в 76 провинциях Таиланда. Результаты показали, что вклад отраслей неоднороден в

пространстве, а эффекты некоторых секторов усиливаются за счет соседства (выявлены агломерационные связи). Авторы пришли к заключению, что для проведения пространственного анализа региональной экономики Таиланда целесообразно кластеризовать провинции по отраслевым профилям с учетом пространственной смежности или же интерпретировать кластеры через доминирующие отрасли и их потенциальные спилловер-эффекты (спилловер-эффект – экономическое явление, когда одни значимые экономические события ведут к возникновению других, при этом вторые могут не иметь явной связи с первыми).

Авторы (Park et al., 2022) предложили инновационную модель машинного обучения, основанную на агрегировании многоуровневой геопространственной информации. Применение данной модели к Таиланду позволило определить ключевые индикаторы экономического развития на региональном уровне. Разработанный в исследовании подход позволяет осуществлять прогнозирование экономического развития в условиях неполных или гетерогенных данных.

В (Whewey and Punmanee, 2020) ставится под вопрос эффективность одностороннего подхода к региональному развитию Таиланда, в котором приоритет отдается Бангкоку. Авторы заключают, что участие периферийных провинций в глобальных производственных сетях остается слабо развитым и требует институциональной поддержки для стимулирования экономического развития страны за пределами столичной агломерации.

Цифровые факторы также оказывают существенное влияние на пространственное неравенство. Авторы (Setthasuravich and Kato, 2022) показали, что цифровой разрыв влияет на эффективность транспортной политики. Используя пространственные модели (SAR/SEM), они пришли к заключению, что цифровая обеспеченность населения модифицирует эффект транспортной политики, а влияние распространяется на соседние территории. Для кластеров это означает, что показатель развития цифровой инфраструктуры в пространственных исследованиях Таиланда стоит учитывать как признак-пространство, иначе будет проигнорирован важный аспект возможности «усвоения» инфраструктурных инвестиций, рознящийся по провинциям. В более позднем исследовании (Setthasuravich et al., 2024) авторы выявили наличие устойчивых паттернов цифрового неравенства на субрайонном уровне. Это свидетельствует о том, что цифровая инфраструктура может выступать определяющим фактором при формировании кластеров регионов.

Экологические и энергетические ограничения также выступают значимыми факторами экономического развития. Так, авторы (Srisaringkarn and Aruga, 2025b) установили наличие пространственного влияния уровня загрязнения воздуха (PM_{2.5}) на экономический рост провинций Таиланда. Было выявлено, что высокие уровни PM_{2.5} статистически связаны со снижением темпов экономического роста, при этом эффект варьируется от провинции к провинции. Авторы подчеркивают важность включения «экологических» маркеров экономического развития регионов, например, отдельно идентифицировать кластеры с «экологическими ограничениями» и учитывать это при интерпретации результатов. В другой их работе (Srisaringkarn and Aruga, 2025a) была оценена взаимосвязь между энергопотреблением и экономическим развитием в рамках гипотезы экологической Кривой Кузнеца. Авторы использовали пространственные панельные модели, включая Spatial Panel Lag и Spatial Dynamic Panel Lag IV, чтобы исследовать взаимосвязь ВРП на душу населения и уровня энергопотребления. По результатам исследования была выявлена U-образная зависимость (в ряде провинций Таиланда), сильная кластеризация энергопотребления и значимые

пространственные спилловер-эффекты. Оба исследования подтверждают значимость включения экологических индикаторов при проведении кластерного анализа регионов.

В ряде пространственных исследований авторы опираются на спутниковые данные в качестве исходных данных. Так, авторы (Puttanapong et al., 2022) установили, что ночные световые данные позволяют выявлять пространственные различия в уровне регионального экономического неравенства. В (Puttanapong et al., 2023) авторы применили методы машинного обучения для прогнозирования провинциального ВВП. С помощью комбинации VIIRS-огней и методов пространственной статистики и эконометрики они выявили сильную пространственную автокорреляцию и устойчивые «горячие» и «холодные» кластеры, совпадающие с инфраструктурными и урбанизационными паттернами провинций Таиланда.

Подобный подход был использован и в (Hutasavi and Chen, 2024): авторы определили, как рост индустриальных зон в Восточном экономическом коридоре отражается на уровне бедности. В исследовании были использованы методы анализа пространственно-временных данных и индикаторы ночного освещения.

Ряд исследований фокусируется на специфических сферах, влияющих на региональное экономическое развитие. Так, авторы (Khemthong et al., 2024) выявили ключевые детерминанты туристических потоков Таиланда и их взаимодействия, определив различия в факторах развития туристических провинций. Они заключают, что эффекты детерминант туризма нелинейны и зависят от сочетаний (например, развитие инфраструктуры и безопасности или же безопасности туристической провинции и доступности туристического направления), то есть одинаковые уровни отдельных факторов имеют разную силу связи при разных комбинациях. Авторы подчеркивают, что при проведении кластерного анализа важно допускать наличие нелинейности взаимодействия отобранных признаков.

В (Chutiphongdech et al., 2025) было оценено влияние проведения спортивного события на рост доходов в провинции. Исследование строится как квази-эксперимент на панельных региональных данных с сопоставлением динамики «принимающих» и контрольных территорий в периоды до и после проведения спортивных событий, что позволяет отделить эффект события от фоновых трендов. Авторы выявили наличие значимых краткосрочных приростов провинциальных доходов и занятости в секторе услуг и связанных отраслях, а также наличие пространственных перетеканий в соседние провинции (спилловер-эффектов).

Авторы (Homsombat et al., 2025) в своем исследовании оценили вклад «атрибутов креативного города» (плотность культурных институтов, креативные индустрии, человеческий капитал и т.п.) в региональное экономическое развитие Таиланда. Результаты иллюстрируют, что высокий уровень креативного развития связан с более высокими темпами экономического развития, причем влияние усиливается в агломерационных зонах.

Еще одним примером применения кластерного подхода в оценке экономического развития Таиланда является работа (Kantachote and Wiroonsri, 2023). Авторы разработали восьмиклассовую типологию качества жизни в Таиланде на основе многомерных показателей (доходы, доступ к услугам, здоровье, окружающая среда и др.). Результаты исследования показали, что регионы с близкими экономическими метриками могут резко различаться по уровню качества жизни, а выделенные кластеры устойчиво сегрегированы в пространстве.

На международном уровне аналогичный подход был применен в (Mathrani et al., 2023). Авторы осуществили кластеризацию 45 азиатских стран по индикаторам Целей устойчивого

развития, демонстрируя, что даже при крупной пространственной агрегации устойчиво выделяются группы с различными траекториями по социальным, экологическим и экономическим целям.

Большое количество аналогичных исследований экономического развития в разрезе регионального деления касается и прочих государств и административно-территориальных единиц.

В (Zhang et al., 2023) авторы предложили оценку пространственных спилловер-эффектов от туризма на рост межрегионального дохода в Китае. Результаты показали, что туризм влияет не только на провинцию, являющуюся туристическим центром, но и на соседние регионы, усиливая мультипликативный эффект от инвестиций в инфраструктуру и продвижение развития инфраструктуры, что влечет за собой экономическое развитие рассматриваемых регионов.

Пространственный подход к моделированию экономического развития реализован и в (Su et al., 2023), где на примере агломерации дельты Янцзы в Китае анализируется эффективность «зеленого» экономического развития с помощью модели SBM (Slack-Based Measure) в сочетании с пространственной автокорреляцией. Авторы показывают, что экологические инициативы и институциональная координация между регионами оказывают значимое влияние на экономическое развитие при сохранении общей экономической устойчивости. Схожее исследование, но для трех основных регионов Европейского Союза (NUTS 3), было осуществлено в (de Campos et al., 2024). Авторы использовали кластерный подход для выявления региональных траекторий экономического развития в рассматриваемых территориальных единицах.

Другое исследование, (Cerqueti et al., 2024), основано на разработке усовершенствованного варианта пространственной авторегрессии (SCSAR-модель), где параметры модели варьируются внутри кластеров регионов (в данном исследовании – регионов Италии). Авторы подчеркивают, что такой подход к изучению факторов экономического развития позволяет учитывать не только глобальную пространственную зависимость, но и локальную гетерогенность, что особенно важно в условиях мультицентральной структуры исследуемой страны, и это схоже с особенностями экономической структуры Таиланда.

В совокупности рассмотренные исследования подтверждают, что современное понимание регионального развития выходит за пределы традиционного анализа экономических показателей. Оно требует интеграции экономических, социальных, цифровых, экологических и инфраструктурных факторов с применением методов пространственной статистики и кластерного анализа. Именно такой подход обеспечивает целостное понимание различий между территориальными единицами и позволяет формировать более обоснованную экономическую политику на региональном уровне. Тем не менее ни в одном из рассмотренных исследований не была осуществлена кластеризация провинций с использованием как классических, так и новых методов, а также провинции Таиланда не были пространственно оценены в контексте влияния на экономическое развитие всей страны. Следовательно, данная работа восполняет существующий пробел в научной сфере, предлагая ранее не освещенный подход к пространственному анализу экономического развития Таиланда.

3. Материалы и методы

Рассмотрим методологию проведения исследования. Кластерный анализ по методологии делится на две группы:

1. Иерархическая кластеризация – данный метод создает иерархию кластеров, которая может быть представлена в виде древовидной структуры (дендрограммы) (Altuntas et al., 2022).

2. Разделительная кластеризация – данный метод предполагает, что число кластеров задается заранее, и алгоритмы стремятся минимизировать вариацию внутри кластеров и максимизировать вариацию между кластерами.

Ключевыми достоинствами кластерного анализа является то, что он дает возможность сгруппировывать многомерные данные с большим набором признаков, не накладывает никаких ограничений на используемые в анализе переменные и позволяет быстро обработать и сжать большие массивы социально-экономической информации.

Наиболее часто используемые методы кластеризации – K-means (K-средних), иерархическая кластеризация и DBSCAN. K-means считается наиболее простым алгоритмом кластерного анализа (Kantachote and Wiroonsri, 2023; Ryu et al., 2024). Он минимизирует сумму квадратов расстояний от каждой точки данных до центра ближайшего ей кластера, а математически суть метода заключается в минимизации суммы квадратов расстояний от каждой точки данных до центра ближайшего ей кластера. K-means задается функцией, представленной ниже, которую минимизирует алгоритм:

$$G = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2,$$

где:

k – количество кластеров;

S_i – множество точек данных в i -м кластере;

μ_i – центроид (среднее значение всех точек) i -го кластера.

Мера близости по умолчанию в K-means – Евклидово расстояние, а его возведение в квадрат позволяет придать большие «веса» наиболее отдаленным друг от друга точкам. Данный метод итеративный и состоит из следующих шагов (Kantachote and Wiroonsri, 2023; Ryu et al., 2024):

1. Подготовка и нормализация данных с целью достижения безразмерности и нормализованности показателей.
2. Инициализация, при которой выбираются k центроидов.
3. Присвоение, при котором каждая точка данных присваивается к ближайшему центроиду.
4. Обновление, во время которого центроиды пересчитываются как среднее всех точек, присвоенных к этому кластеру.
5. Итерация: последние два шага повторяются до сходимости (когда присвоения больше не изменяются).

Для определения числа кластеров самым распространенным является метод локтя. Метод заключается в построении зависимости функции $G(k)$ и определении точки на графике, после которой минимизация функции становится незначительной.

Другим распространенным методом кластеризации является алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) (Tu et al., 2022; Xiao et al., 2022). Алгоритм был предложен в 1996 г. М. Эстером для разбиения данных на кластеры произвольной формы. Метод используется для кластеризации пространственных данных с присутствием шума. Суть метода состоит в том, чтобы вычислить области высокой плотности элементов данных, которые отделены друг от друга областями низкой плотности. Основные понятия, которые включает данный алгоритм это:

1. Ядро (Core) – точка, имеющая не менее определенного количества других точек (MinPts) в пределах заданного радиуса ϵ (eps).
2. Граничная точка (Border) – точка, имеющая менее MinPts точек в радиусе ϵ , но находящаяся в радиусе ϵ от ядра точки.
3. Шум (Noise) – точка, которая не является ни ядром, ни границей.

К параметрам алгоритма DBSCAN относятся:

1. ϵ (eps) – максимальное расстояние между двумя точками, при котором одна точка может быть считана соседней другой.
2. MinPts – минимальное количество точек, необходимое для формирования плотного региона (то есть для того, чтобы точка считалась ядром).

Основными этапами алгоритма DBSCAN являются (Tu et al., 2022; Xiao et al., 2022):

1. Задание значения минимального количества точек MinPts и радиуса ϵ . Это необходимо для идентификации любой точки как принадлежащей кластеру и других точек, находящихся в указанном радиусе.
2. Перебор элементов выборки. Если для элемента существует не менее MinPts ближайших соседей в радиусе ϵ , формируется кластер, в противном случае точка помечается как шум. Далее после перебора она может стать частью другого кластера.
3. Рассмотрение всех ближайших соседей при переборе элементов выборки. Если у точки находится MinPts ближайших соседей, она попадает в тот же кластер, что и предыдущая, и становится ядровой, в противном случае она отмечается как граничная.
4. Повторение алгоритма, пока не будут проанализированы все точки выборки.

Выбор метода кластеризации напрямую зависит от качества анализируемых данных, их вида и структуры. Сравнение алгоритмов по их параметрам и результатам сведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение методов кластеризации

Алгоритм	Входные данные	Результат кластеризации
K-means	число кластеров	центры (центроиды) кластеров
Иерархическая кластеризация	число кластеров	дерево (дендрограмма) кластеров
DBSCAN	ϵ -окрестность, минимальное количество соседних точек	ядровые точки (центры кластеров) с радиусом ϵ -окрестности

Качество проведения кластерного анализа также зависит от выбора метода расчета дистанции (расстояния) между точками. В исследовании в качестве метрики расстояния было

использовано Евклидово расстояние, которое используется для придания больших весов аномальным точкам:

$$d(x, x') = \sqrt{\sum_i^n (x_i - x'_i)^2}.$$

Рассмотрим показатели качества кластеризации, использованные в исследовании.

Первый показатель качества – индекс Калински–Харабаса. Пусть \bar{d}^2 – средний квадрат расстояния между точками в кластеризируемом множестве и \bar{d}^2_{ci} – средний квадрат расстояний между точками в кластере ci . Тогда сумма расстояний внутри групп задается следующим выражением:

$$WGSS = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^c (n_{ci} - 1) \bar{d}^2_{ci},$$

а сумма расстояний между группами:

$$BGSS = \frac{1}{2} \left((c - 1) \bar{d}^2 + (N - c) A_c \right),$$

где A_c – взвешенная усредненная разница расстояний между центрами кластеров и общим центром множества.

Тогда формула индекса Калински–Харабаса:

$$VRC = \frac{\frac{BGSS}{c-1}}{\frac{WGSS}{N-c}} = \frac{\bar{d}^2 + \frac{N-c}{c-1} A_c}{\bar{d}^2 - A_c} = \frac{1 + \frac{N-c}{c-1} a_c}{1 - a_c},$$

$$a_c = \frac{A_c}{\bar{d}^2}.$$

Индекс Калински–Харабаса предоставляет численное значение, которое помогает сравнивать качество различных кластеризаций. Большее значение индекса указывает на лучшую кластеризацию, что означает хорошую разделенность кластеров (высокое межкластерное расстояние) и плотную сгруппированность внутри (низкое внутрикластерное расстояние).

Второй показатель качества – коэффициент силуэта (Silhouette Coefficient). Коэффициент силуэта измеряет, насколько хорошо каждый объект был сгруппирован с другими объектами в его кластере относительно объектов в других кластерах, и для каждого объекта рассчитывается следующим образом:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}},$$

где:

$a(i)$ – среднее расстояние между i -м объектом и всеми другими объектами в том же кластере;

$b(i)$ – минимальное среднее расстояние от i -го объекта до объектов в другом кластере, т.е. ближайший кластер.

Оценка силуэта для всей кластерной структуры производится с помощью среднего по всем элементам кластера.

Коэффициент силуэта принимает значения от -1 до $+1$:

1. значение близкое к $+1$ указывает на то, что объект хорошо сгруппирован внутри своего кластера и далек от объектов других кластеров;
2. значение близкое к 0 означает, что объект находится на границе между двумя кластерами;
3. значение близкое к -1 указывает на то, что объект был неправильно сгруппирован, так как другие кластеры ближе к объекту, чем его собственный.

Коэффициент силуэта является одной из наиболее универсальных и популярных метрик для оценки результатов кластеризации, так как он не требует знания истинных меток кластеров и эффективен для различных типов данных и методов кластеризации.

Для проверки гипотезы высокой региональной дифференциации принято использовать ряд методов, таких как дециальный коэффициент, коэффициент осцилляции, индекс Тейла, индекс Аткинсона, коэффициент Уильямсона и др. В данном исследовании анализ дифференциации регионов Таиланда проведен с помощью коэффициента Уильямсона, который позволяет взвесить регионы по численности населения, что является преимуществом, так как население в разрезе регионов (77 провинций Таиланда) в рассматриваемом периоде (2010–2021 гг.) распределено неравномерно. Математически расчет коэффициента Уильямсона представлен формулой:

$$V_W = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \frac{p_i}{P}}}{\bar{x}},$$

где:

x_i – чистый провинциальный продукт (ЧПП) i -й провинции на душу населения;

\bar{x} – средний провинциальный продукт по всем провинциям;

p_i – численность населения i -й провинции;

P – общая численность населения всех провинций.

Таким образом, все вышеописанные методы применимы для анализа провинциальной специфики Таиланда, так как позволяют оценить внутренние закономерности при исследовании экономического развития страны.

Программой средой для проведения кластерного анализа были выбраны язык программирования Python и библиотека scikit-learn. В данной библиотеке содержатся все необходимые функции для нормализации данных, а также набор самых распространенных функций кластерного анализа при параметрах, которые задает пользователь.

В качестве исходных данных для проведения кластерного анализа были отобраны социально-экономические показатели за 2012–2020 гг. по 77 провинциям Таиланда. Выбор указанного периода обусловлен отсутствием данных за более ранние и поздние промежутки времени по ряду провинций. В качестве факторов были отобраны признаки, указанные в табл. 2.

Таблица 2. Отобранные признаки

Описываемая область	Наименование признака	Обозначение	Единица измерения
Экономическое развитие	ЧПП на душу населения	X_1	Бат/чел.
Движение иностранной рабочей силы	Число мигрантов, получивших разрешение на работу	X_2	Чел.
Промышленность	Инвестиции в промышленный сектор экономики на одного занятого	X_3	Бат/чел.
Сельское хозяйство	Использование земли	X_4	Рай
Туризм	Численность иностранных туристов	X_5	Чел.

4. Результаты

Для проверки гипотезы высокой региональной дифференциации Таиланда был использован коэффициент Уильямсона по ранее описанной методологии (табл. 3). Анализ был выполнен за 2010 и 2021 гг. в номинальных и реальных ценах 2010 г. По полученным данным можно сделать вывод о том, что уровень экономического развития провинций Таиланда имеет высокую степень дифференциации, а разрыв только увеличился за рассматриваемый период, несмотря на реализацию политики «Таиланд 4.0», направленную на сокращение социально-экономического неравенства (табл. 3).

Таблица 3. Расчетный коэффициент Уильямсона в 2010 и 2021 гг.

Период	Номинальный ЧПП на душу населения	Реальный ЧПП на душу населения (в ценах 2010 г.)
2010	121.56%	121.51%
2021	127.46%	127.46%

Ввиду сильной провинциальной дифференциации Таиланда интерес представляют детальный анализ и группировка провинций по степени влияния на экономику страны в целом. Данный подход позволяет определить наиболее экономически развитые провинции. Группировка была выполнена по двум критериям:

1. Индекс роста ЧПП на душу населения ΔGPP_i , где i – признак принадлежности к провинции 1...77.
2. Индекс роста населения ΔP_i , где i – признак принадлежности к провинции 1...77.

Сравнение указанных критериев было осуществлено с пороговыми значениями, в качестве которых были использованы средние значения индексов за 2021 г. по всем 77 провинциям. Возможно деление провинций на четыре группы в зависимости от комбинации признаков H (high) и L (low), которые присваиваются каждому критерию:

1. HH – значение индекса роста показателя больше 1 и больше среднего значения по стране.

2. HL – значение индекса роста показателя больше 1, но меньше среднего значения по стране.
3. LH – значение индекса роста показателя меньше 1, но больше среднего значения по стране.
4. LL – значение индекса роста показателя меньше 1 и меньше среднего значения.

В зависимости от отнесения рассчитанного значения индекса в одну из четырех комбинаций все провинции могут быть разделены на пять групп:

1-я группа (комбинация HH_HH) – провинции с наиболее высоким уровнем социально-экономического развития. Они характеризуются положительным, превышающим средние значения, темпом прироста ЧПП и населения и оказывают наиболее сильное влияние на экономику. Им не требуются корректирующие мероприятия по поддержанию экономического роста, но необходимо продолжать реализацию текущих мер, направленных на повышение экономического роста.

2-я группа (комбинации HH_HL, HL_HH, LH_HH, HH_LH) – провинции со средним уровнем влияния на экономический и социальный климат Таиланда. Они могут иметь небольшие отрицательные темпы прироста каждого показателя, но меньшие, чем средние значения по всем провинциям, или, наоборот, значения темпов прироста положительны, но меньше, чем средние значения по всем провинциям.

3-я группа (комбинации LL_HH, HL_HL, HH_LL, LH_HL, LH_LH) – провинции с уровнем влияния на экономику Таиланда ниже среднего. Они могут характеризоваться отрицательными и ниже среднего значениями одного из показателей, при этом второй индекс будет положительным или выше среднего по всем 77 провинциям. Принадлежность к данной группе свидетельствует о том, что на экономическое и социальное развитие влияют иные дестабилизирующие факторы, не входящие в социально-экономическую плоскость.

4-я группа (комбинации LL_HL, HL_LL, LH_LL, LL_LH) – провинции с отрицательным влиянием на экономическое и социальное положение Таиланда. Они могут характеризоваться отрицательными приростами обоих показателей, что свидетельствует о необходимости проработки новых комплексных мер по повышению экономического роста.

5-я группа (комбинация LL_LL) – провинции с наиболее высокими по модулю отрицательными индексами роста ЧПП и населения. Принадлежность к этой группе свидетельствует о том, что управление на муниципальном уровне в данных провинциях неэффективно и требуется кардинально новый комплекс мероприятий по всем исследуемым факторам в рамках провинциальной социально-экономической политики.

Представим возможные комбинации критериев в формате матрицы в табл. 4.

Таблица 4. Матрица комбинации индикаторов для группировки провинций

Комбинации	$1 < \Delta \bar{P}_i < \Delta P_i$	$1 < \Delta P_i < \Delta \bar{P}_i$	$\Delta P_i < 1 < \Delta \bar{P}_i$
$1 < \Delta \overline{GPP}_i < \Delta GPP_i$	HH_HH	HH_HL	HH_LL
$1 < \Delta GPP_i < \Delta \overline{GPP}_i$	HL_HH	HL_HL	HL_LL
$< \Delta GPP_i < 1 < \Delta \overline{GPP}_i$	LL_HH	LL_HL	LL_LL

Результаты группировки 77 провинций по данным индекса роста ЧПП на душу населения (в реальных ценах 2012 г.) и индекса роста населения представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты группировки провинций Таиланда

1-я группа	2-я группа	3-я группа	4-я группа	5-я группа
16	8	33	12	8

По итогам анализа провинций по уровню экономического и социального развития следует отметить, что в 1-ю группу с высоким влиянием на экономический рост Таиланда входят 16 провинций (21%), большая часть провинций в рассмотренном периоде (41%) входит в 3-ю группу.

Проанализируем представителей 1-й группы более подробно. В ее состав входят представители всех регионов Таиланда, больше всего провинций из Южного и Восточного Таиланда (табл. 6).

Таблица 6. Состав 1-й группы в разрезе регионов и количества провинций

Бангкок и окрестности	Центральный Таиланд	Восточный Таиланд	Северо-Восточный Таиланд	Южный Таиланд	Западный Таиланд
2	1	4	1	7	1

Несмотря на то, что Бангкок является столицей и центром экономической активности Таиланда (в 2021 г. в нем было сосредоточено более 30% ВВП), регион попал во 2-ю группу, так как индекс прироста ЧПП был ниже среднего по стране. Такой результат является следствием пандемии COVID-19, поскольку Бангкок пострадал от кризиса сильнее, чем другие провинции, и в нем, вероятно, наблюдалось большее снижение ВВП на душу населения, чем в среднем по стране. Результаты проведенного анализа также позволили выявить высокое экономическое влияние провинций Южного Таиланда: Накхонситхаммат, Сонгкхла, Сатун, Яла, Транг, Наратхиват и Паттани. Ранее при анализе динамики ЧПП данного региона он показывал наименьший результат среди всех провинций; по данным о численности населения в 2021 г. в данном регионе проживало 14% всего населения Таиланда. Возможно, в данном случае имеет место β -конвергенция, когда более бедные регионы показывают более высокие темпы экономического развития.

Далее была проанализирована кластерная структура Таиланда с использованием ранее описанных методов кластеризации. Для проверки гипотезы о высокой дифференциации провинций Таиланда, помимо проведенной классификации по индексам роста ЧПП и населения, интерес представляет рассмотрение и других социально-экономических показателей, оказывающие влияние на экономический рост провинций Таиланда.

Ввиду высокого размаха отобранных данных, с целью подчеркнуть различие между провинциями, была использована минимаксная нормализация. Метрикой расстояния для анализа было выбрано Евклидово расстояние, так как в данных нет пропусков и временные ряды, используемые для анализа провинций, достаточно короткие.

Для подбора числа кластеров были рассмотрены значения коэффициента качества кластеризации и осуществлен подбор числа кластеров таким образом, при которых коэффициент силуэта и индекс Калински–Харабаса был наибольшим (рис. 1).

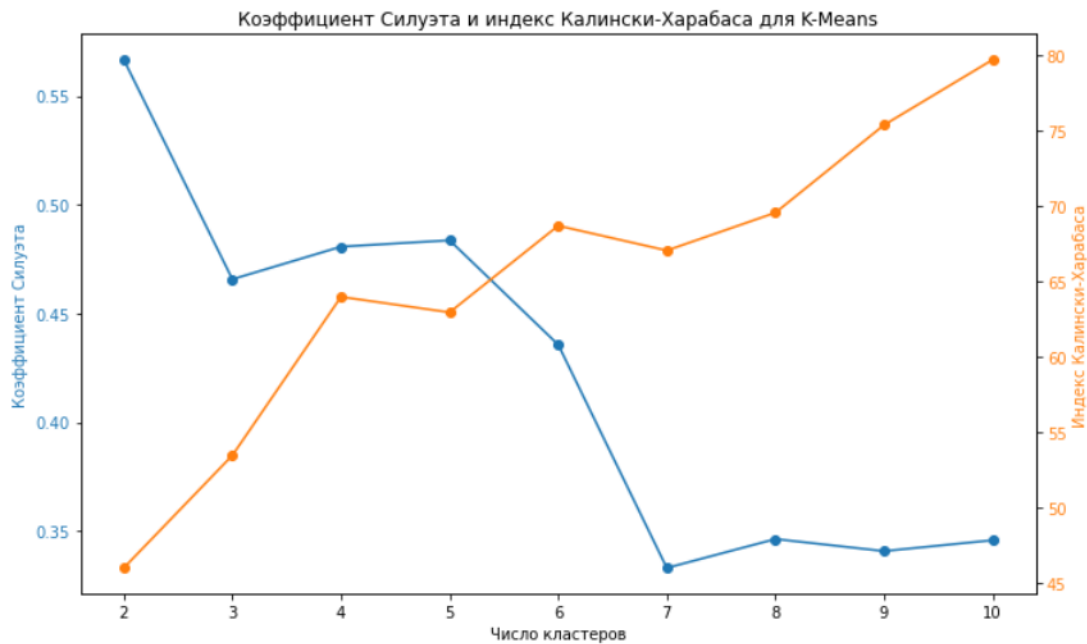


Рисунок 1. Подбор числа кластеров с помощью метрик качества кластеризации

Из рисунка видно, что с увеличением числа кластеров обе метрики показывают совершенно разные результаты. При двух кластерах достигается максимум метрики силуэта, но при этом индекс Калински–Харабаса имеет наименьшее значение. Это не даст возможности увидеть закономерности у провинций, так как будет осуществлено разделение лишь на условно-богатые и условно-бедные. Поэтому для кластеризации было выбрано три кластера, при которых индекс Калински–Харабаса равен 53.471 а силуэт – 0.466. Приведем диаграмму метода локтя для большей наглядности выбора трех кластеров на рис. 2.

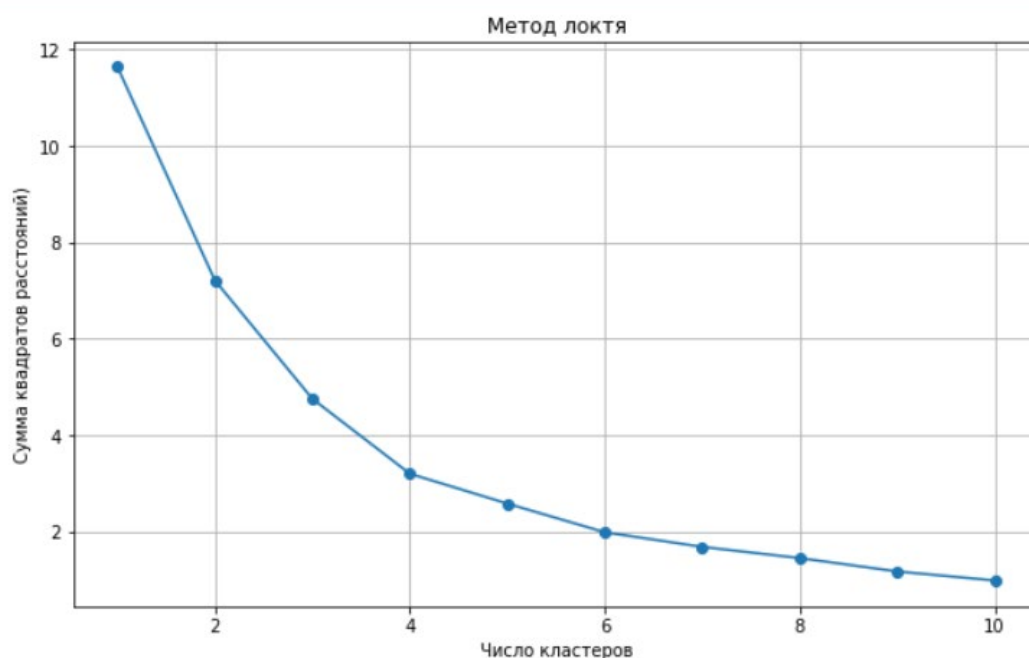


Рисунок 2. Метод локтя для определения числа кластеров

Рассмотрим рассчитанные средние показатели для трех кластеров (рис. 3).

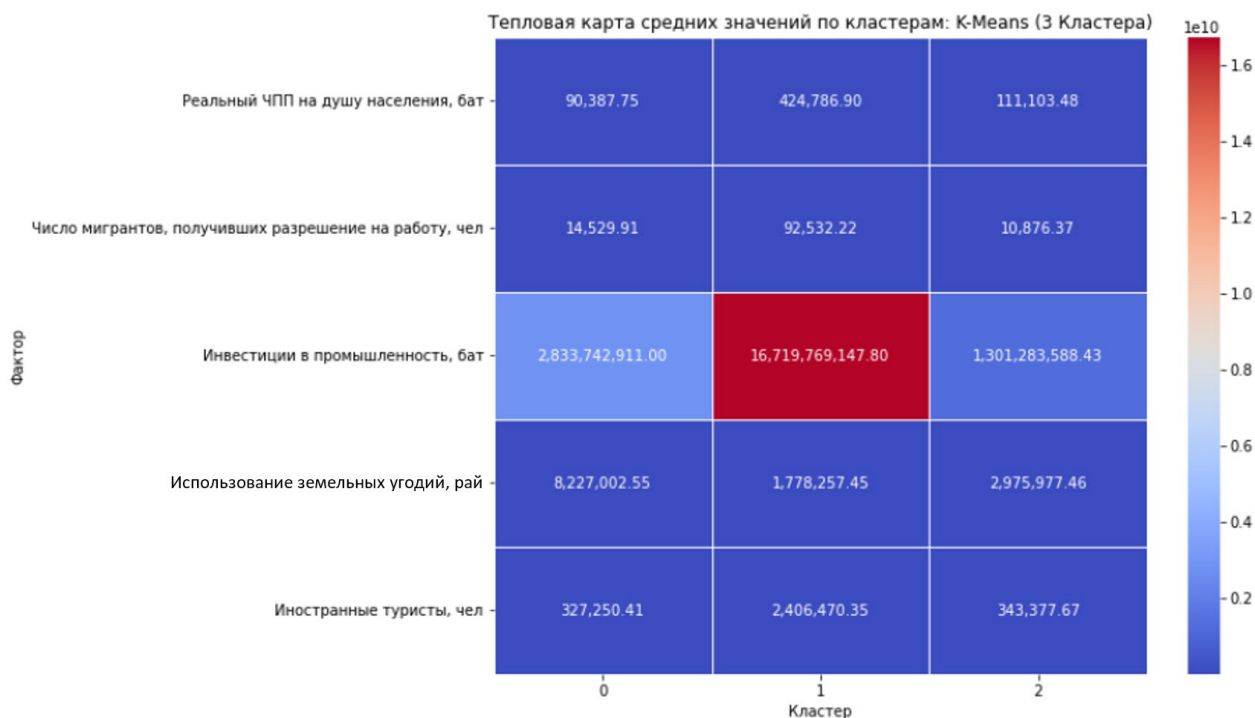


Рисунок 3. Средние значения признаков для трех кластеров

Из приведенного выше рисунка видно, что в 1-й кластер попали наиболее экономически развитые провинции с наибольшим средним притоком иностранной рабочей силы и туристов и наибольшим средним провинциальным продуктом на душу населения. По показателю использования земли 1-й кластер, наоборот, демонстрирует наименьшие в среднем результаты, что подчеркивает статус входящих в него провинций как индустриальных центров страны. В 1-й кластер вошли Аюттхая, Бангкок, Чаченгсау, Чонбури, Накхопатхом, Патхумтхани, Прачинбури, Районг, Самутпракан, Самутсакхон, Сарабури. Несколько этих провинций также попали в группу наиболее влияющих на экономику страны провинций при проведении анализа НН_LL, который был описан ранее.

Во 2-й кластер попали провинции с промежуточной экономикой: у них по сравнению с 0-м кластером незначительно отличаются средние инвестиции в промышленность и ЧПП на душу населения, однако наблюдается сильный разрыв в использовании земельных угодий, что говорит о том, что во 2-м кластере сосредоточены индустриально-развитые провинции с высоким уровнем инфраструктуры (большой приток туристов, относительно высокий ЧПП).

В 0-й кластер попали аграрные провинции, у которых наблюдается самое высокое использование земли (что говорит о развитом сельском хозяйстве), большой приток иностранной рабочей силы, а также наименьший средний ЧПП на душу населения.

Картографическая визуализация деления провинций на кластеры представлена на рис. 4.

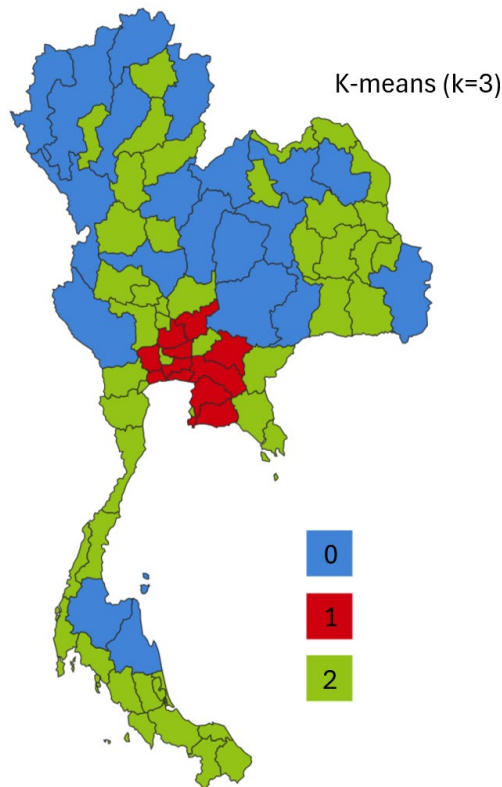


Рисунок 4. Карта Таиланда при делении провинций на кластеры для $k = 3$

Из карты на рисунке 4 видно, что самые богатые провинции сосредоточены в Центральном Таиланде, рядом с метрополией Бангкока. В Южном и Северо-Восточном Таиланде большая часть провинций относится ко 2-му кластеру, для которого характерно большое количество мигрантов, относительно высокие инвестиции в промышленность, развитая туристическая инфраструктура и отельный бизнес. Провинции этого кластера популярны среди туристов, так как находятся на побережье и имеют прямой выход к океану.

К 0-му кластеру по большей части относятся провинции, расположенные в северной части страны, где меньше туристов и высокий уровень инвестиций в промышленный сектор экономики. Провинции этого кластера являются производственными центрами страны, создающими рабочие места. Это заключение подтверждается и исследованием по разработке мер в области поддержки индустриальных кластеров Таиланда, где при анализе деятельности предприятий в пяти отраслях промышленности показано, что большое количество агроперерабатывающих предприятий сосредоточено в Северном и Северо-Восточном Таиланде. Помимо этого, в данном кластере в среднем большое количество мигрантов, получивших разрешение на работу.

Для тестирования стабильности полученных результатов была осуществлена аналогичная кластеризация провинций Таиланда с $k = 4$. Полученные результаты аналогичны кластеризации при $k = 3$, но в 4-й кластер был выделен Бангкок, а остальное деление кластеров осталось прежним, что подтверждает состоятельность полученных результатов при трехкластерном делении.

Проведение иерархической агломеративной кластеризации также дало аналогичные результаты (рис. 5, 6).

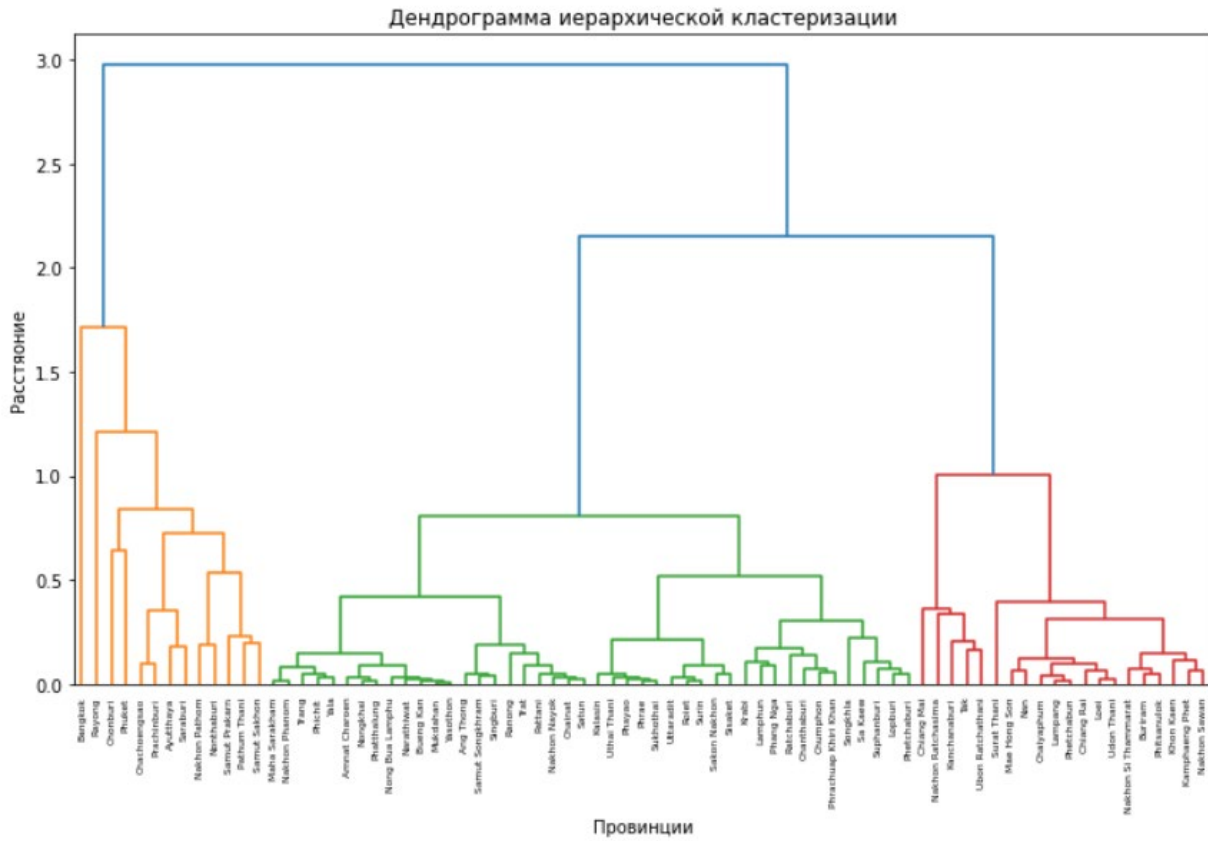


Рисунок 5. Дендрограмма иерархической кластеризации при $k = 3$

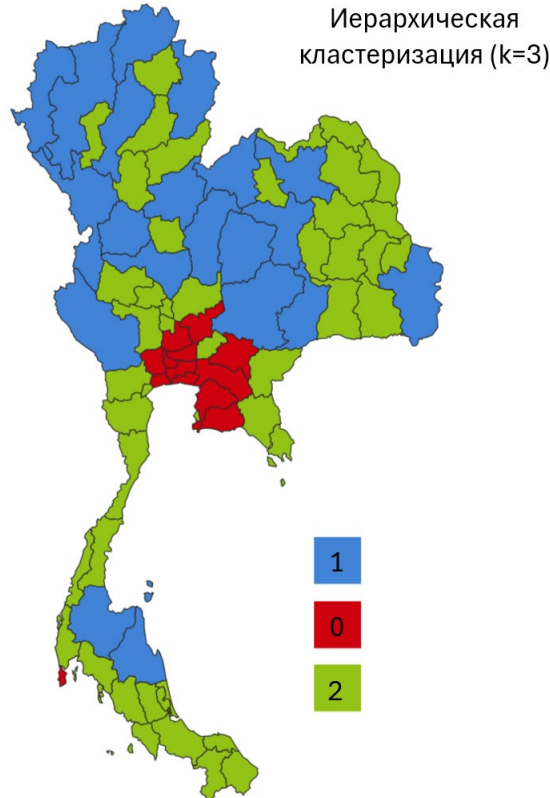


Рисунок 6. Деление провинций при иерархической кластеризации

Третьим алгоритмом кластеризации, который был применен в данном исследовании, является DBSCAN.

В соответствии с ранее описанной методологией при проверке параметров ϵ -окрестности и минимального количества точек была проведена проверка количества уникальных меток кластеров, исключая шум. Если кластеров меньше двух, были установлены значения метрик: 1 для коэффициента силуэта и бесконечность для индекса Калински–Харабаса. Таким образом, в результате подбора оптимальными параметрами для реализации были выбраны:

1. ϵ -окрестность – 0.3;
2. минимальное количество точек – 3.

При заданных параметрах было получено два кластера, коэффициент силуэта равен 0.509, а индекс Калински–Харабаса равен 29.382. Рассмотрим картографическое отображение состава кластеров (рис. 8).



Рисунок 6. Деление провинций на кластеры DBSCAN

DBSCAN показывает различимость кластеров гораздо хуже, чем все вышеописанные алгоритмы. К 1-му «богатому» кластеру были отнесены только Бангкок и Районг, отмеченные красным на рис. 6. Реализованный алгоритм DBSCAN не позволяет адекватно интерпретировать полученные кластеры.

Сведем результаты всех реализованных методов кластеризации в табл. 7.

Таблица 7. Результаты кластерного анализа

Метод	Коэффициент силуэта	Индекс Калински–Харабаса
К-means ($k = 3$)	0.47	53.47
К-means ($k = 4$)	0.48	63.98
Agglomerative clustering ($k = 3$)	0.45	50.81

Метод	Коэффициент силуэта	Индекс Калински–Харабаса
DBSCAN	0.51	29.38

Таким образом, при отборе оптимальной кластеризации по метрикам качества наилучшие результаты по двум метрикам показывает алгоритм K-means на четыре кластера с наибольшим коэффициентом силуэта и индексом Калински–Харабаса. Особенность по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами заключается в том, что при $k = 4$ в отдельный кластер выделяется Бангкок. В других рассмотренных методах Бангкок был отнесен к наиболее «богатому» кластеру, в составе которого были его окрестности и немногочисленные провинции Центрального Таиланда.

Наложим результаты кластеризации на ранее полученные девять комбинаций индексов роста населения и ЧПП, взятых за 2021 год (рис. 7).

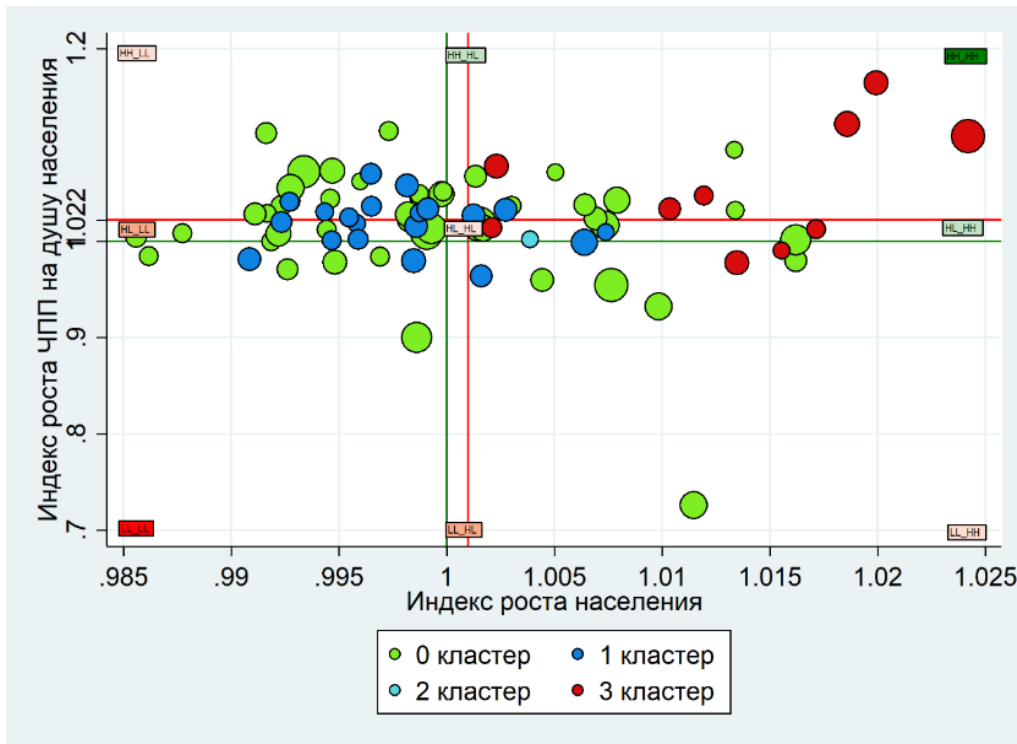


Рисунок 7. Распределение кластеров по уровню социального и экономического развития в 2021 г.

На графике, изображенном на рис. 7, красные линии показывают средние значения индексов роста ЧПП на душу населения и численности населения в 2021 г., размер «пузырька» соответствует абсолютным значениям ЧПП на душу населения в каждой провинции в 2021 г. По итогам группировки провинций было определено, что большая часть провинций (33 из 77) в 2021 г. относилась к 3-й группе, изображенной по левой диагонали на рис. 7. Стоит заметить, что больше всего к 3-й «переходящей» группе относятся провинции 0-го кластера. Как и ожидалось, провинции 3-го «богатого» и развитого кластера из окрестностей Бангкока не попали в данную группу. Провинции 0-го кластера по большей части расположены в Южном и Северо-Восточном Таиланде: 0-й кластер, как ранее было отмечено, имеет высокий поток туристов, хорошо развитую сферу услуг, особенно развитый отельный бизнес. В 1-м кластере за счет менее удачного расположения сосредоточены аграрные хозяйства, сконцентрированы агроперерабатывающие предприятия в провинциях Накхонратчасима и Убонратчатхани.

Стоит отметить, что провинции 0-го и 1-го кластеров в основном имеют низкие индексы роста населения в 2021 г., что может быть связано с пандемией Covid-19.

Анализируя 3-й кластер, было заключено, что все входящие в него провинции сосредоточены в правой части графика, что говорит о высоких темпах роста населения в 2021 г. Помимо этого, шесть провинций данного кластера имеют темпы роста населения и ЧПП на душу населения выше среднего в 2021 г., что подчеркивает их высокое экономическое и социальное развитие. Бангкок, как единственный представитель 2-го кластера, в 2021 г. имеет положительный темп роста ЧПП на душу населения. Кроме этого, можно заметить, что в правой части графика также сосредоточено большое количество провинций 0-го и 1-го кластеров, которые в 2021 г. показали высокие индексы роста ЧПП на душу населения и численности населения, несмотря на их «переходящее» состояние экономики, что дает возможность предполагать наличие β -конвергенции.

Перейдем к разработке рекомендаций в части формирования экономической политики Таиланда по результатам проведенного анализа. Сведем вышеперечисленные рекомендации в табл. 8.

Таблица 8. Рекомендации по экономическому развитию провинций в разрезе кластеров

Номер кластера	Характеристика кластера	Рекомендации
0	Туристический	Государственное финансирование проектов, направленных на развитие информационной туристической инфраструктуры: дороги, очистительные сооружения для организации благоприятных условий развития отельного бизнеса.
1	Индустриальный	Содействие внедрению инновационных технологий на аграрных предприятиях, в обрабатывающей и текстильной промышленности с целью повышения производительности труда и привлечения иностранных инвестиций в провинции.
2 и 3	Предпринимательский	Бангкок как столица является не только экономическим центром страны, но и целью назначения высококвалифицированных работников из других стран. В связи с этим необходима государственная поддержка градообразующих предприятий в сфере услуг с целью привлечения квалифицированных кадров и повышения эффективности бизнес-процессов на предприятиях.

Таким образом, содействие распространению информационных и инновационных технологий на государственном уровне в разных отраслях экономики в зависимости от специфики каждого кластера позволит гармонично развивать, поддерживать и выравнивать темпы экономического развития Таиланда с учетом внутренней провинциальной дифференциации.

5. Обсуждение

Полученные результаты кластерного анализа дали возможность выявить особенности пространственной дифференциации социально-экономического развития провинций Таиланда. Во-первых, выявленная высокая провинциальная неоднородность подтверждает тезис о значительном разрыве между ними, который вопреки стратегии «Таиланд 4.0» только увеличился в течение анализируемого периода. Данное наблюдение согласуется с выводами авторов (Tirayalai and Mendez, 2024), показавших наличие локальных процессов конвергенции лишь в отдельных группах провинций, что не отменяет общей тенденции к сохранению межрегиональных различий.

Кластеризация позволила выявить устойчивую трех- и четырехуровневую структуру развития, где наиболее развитые провинции сосредоточены в Центральном регионе и в окрестностях Бангкока, тогда как аграрные территории Северного и Северо-Восточного Таиланда формируют отдельные кластеры. Эти результаты аналогичны результатам исследования (Vaňová et al., 2024), которые также показали, что отраслевые различия и агломерационные эффекты усиливают пространственное неравенство. Вместе с тем в настоящем исследовании подтверждается и вывод работы (Wheway and Punmanee, 2020) о чрезмерной концентрации экономической активности в столичном регионе, что поднимает вопрос о слабом включении периферийных провинций в национальные и глобальные производственные сети.

Важно подчеркнуть, что кластерный анализ с использованием многомерных показателей позволил расширить традиционные оценки, часто ограничивавшиеся изучением отдельных факторов. Например, в отличие от работ (Setthasuravich et al., 2024; Setthasuravich and Kato, 2022), сосредоточенных на цифровом неравенстве, настоящее исследование сочетает сразу несколько индикаторов – от миграции и туризма до инвестиций и использования земельных угодий. Такой подход позволил сформировать более комплексную типологию провинций, но в то же время ограничение заключается в отсутствии детализированных экологических индикаторов, в сравнении, например, с исследованиями (Srisaringkarn and Aruga, 2025a, 2025b), что не дает возможности полноценно учесть влияние факторов устойчивого развития.

С методологической точки зрения выявлено, что наиболее адекватные результаты дают алгоритмы K-means при трех и четырех кластерах, в то время как DBSCAN показал слабую интерпретируемость. Это подтверждает выводы (Kantachote and Wiroonsri, 2023; Mathrani et al., 2023) о применимости классических методов кластерного анализа для построения устойчивых типологий регионов.

С практической точки зрения выявленные кластеры указывают на необходимость дифференцированной региональной политики: индустриальные провинции требуют поддержки инноваций, аграрные – внедрения технологий в агропромышленность, туристические – инфраструктурных инвестиций. Такой вывод согласуется с международными исследованиями (Cerqueti et al., 2024; Su et al., 2023), подчеркивающими важность учета локальной гетерогенности при разработке экономической политики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией пространственной эконометрики и методов машинного обучения, что позволит учесть нелинейные взаимосвязи факторов, аналогично как в (Khemthong et al., 2024), и более четко проследить пространственные спилловер-эффекты. Кроме того, целесообразно расширить временной охват и включить

данные постпандемийного периода, чтобы оценить долгосрочную устойчивость выявленных кластеров.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило значимость кластерного подхода для анализа регионального развития Таиланда, выявило уникальные пространственные закономерности и обозначило пробелы, требующие дополнительного изучения. Полученные результаты вносят вклад в международную дискуссию о пространственном неравенстве и демонстрируют, что эффективная региональная политика невозможна без учета кластерной структуры экономики.

6. Заключение

Проведенный анализ показал, что социально-экономическое развитие провинций Таиланда отличается высокой пространственной дифференциацией, сохраняющейся и усиливающейся в период реализации стратегии «Таиланд 4.0». Кластеризация позволила выявить устойчивое разделение провинций на несколько групп: наиболее развитые территории сконцентрированы в Центральном Таиланде и в окрестностях Бангкока, в то время как провинции Северного и Северо-Восточного Таиланда формируют аграрные кластеры, а территории Южного Таиланда демонстрируют зависимость от туристической отрасли и миграционных потоков.

Сравнение динамики роста численности населения и чистого провинциального продукта показало признаки β -конвергенции для ряда «переходящих» провинций, что свидетельствует о возможности постепенного сближения уровней социально-экономического развития в долгосрочной перспективе. Методологический анализ подтвердил, что наилучшие результаты достигаются при использовании алгоритма K-means с выделением четырех кластеров, среди которых Бангкок формирует самостоятельную группу, что отражает его уникальное положение в национальной экономике.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в том, что разработанная кластерная типология может быть использована для корректировки государственной региональной политики. Для аграрных территорий требуется акцент на внедрение инновационных технологий в агропромышленный сектор, для туристических провинций – развитие инфраструктуры и повышение качества услуг, а для индустриальных и предпринимательских центров – стимулирование инновационной активности, привлечение инвестиций и поддержка цифровой трансформации.

Таким образом, кластерный анализ подтвердил необходимость дифференцированного подхода к управлению региональным развитием Таиланда, обеспечивающего более сбалансированное распределение ресурсов и снижение межпровинциального неравенства. В перспективе дальнейшие исследования целесообразно расширить за счет включения постпандемийного периода, использования пространственной эконометрики и методов машинного обучения, что позволит глубже учесть нелинейные зависимости и выявить пространственные спиллвер-эффекты. Полученные результаты вносят вклад в развитие методологии региональных исследований и могут служить основой для повышения эффективности реализации стратегии «Таиланд 4.0».

Список литературы

Altuntas, S., Selim, S., Altuntas, F., 2022. A hierarchical clustering based panel data approach: A case study of regional incentives. *International Journal of Information Management Data Insights* 2 (2), 100098. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMEI.2022.100098>

- Cerqueti, R., Maranzano, P., Mattera, R., 2024. Spatially-Clustered Spatial Autoregressive Models with Application to Agricultural Market Concentration in Europe. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics* 30, 431–465. <https://doi.org/10.1007/s13253-024-00672-4>
- Chutiphongdech, T., Tangtamaruk, P., Aksornat, A., Tovara, S., Daengmeese, S., Siwarepan, N., 2025. Sport event hosting and provincial economic growth: Evidence from the Bangsaen21 Half Marathon in Thailand. *Humanities and Social Sciences Communications* 12, 1098. <https://doi.org/10.1057/S41599-025-05494-4>
- de Campos, A.C., Lopes, L., Carreira, C., 2024. Spatial Autocorrelation of Exports and R&D Expenditures in Portugal. *Journal of the Knowledge Economy* 15, 8632–8653. <https://doi.org/10.1007/S13132-023-01425-3>
- Homsombat, W., Wrasai, P., Benjabutr, N., 2025. Measuring the impact of creative city attributes on regional economic development in Thailand. *Asia-Pacific Journal of Regional Science* 9, 357–385. <https://doi.org/10.1007/S41685-025-00374-W>
- Hutasavi, S., Chen, D., 2024. Exploring the industrial growth and poverty alleviation through space-time data mining from night-time light images: a case study in Eastern Economic Corridor (EEC), Thailand. *International Journal of Remote Sensing* 45, 7803–7825. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2112111>
- Kantachote, K., Wiroonsri, N., 2023. Octa-Cluster: Different Perspectives on Quality of Life in Thailand. *Sage Open* 13 (4). <https://doi.org/10.1177/21582440231218501>
- Khemthong, S., Luenam, P., Frank, T.D., Ingsrisawang, L., 2024. Identifying the determinants of tourism receipts of Thailand and relevant determinant-determinant interactions. *PLoS One* 19, e0308153. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0308153>
- Mathrani, A., Wang, J., Li, D., Zhang, X., 2023. Clustering Analysis on Sustainable Development Goal Indicators for Forty-Five Asian Countries. *Sci* 5 (2), 14. <https://doi.org/10.3390/SCI5020014>
- Park, S., Han, S., Ahn, D., Kim, J., Yang, J., Lee, S., Hong, S., Kim, J., Park, S., Yang, H., Cha, M., 2022. Learning Economic Indicators by Aggregating Multi-Level Geospatial Information. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36 (11), 12053–12061. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i11.21464>
- Pastpipatkul, P., Ko, H., 2025. The Efficacy of Monetary and Fiscal Policies on Economic Growth: Evidence from Thailand. *Economics* 13 (1), 19. <https://doi.org/10.3390/ECONOMIES13010019>
- Pelsa, I., Balina, S., 2022. Development of economic theory – from theories of economic growth and economic development to the paradigm of sustainable development. *DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting* 7 (1), 91–101. <https://doi.org/10.17818/DIEM/2022/1.10>
- Puttanapong, N., Luenam, A., Jongwattanakul, P., 2022. Spatial Analysis of Inequality in Thailand: Applications of Satellite Data and Spatial Statistics/Econometrics. *Sustainability* 14 (7), 3946. <https://doi.org/10.3390/SU14073946>
- Puttanapong, N., Prasertsoong, N., Peechapat, W., 2023. Predicting Provincial Gross Domestic Product Using Satellite Data and Machine Learning Methods: A Case Study of Thailand. *Asian Development Review* 40 (2), 39–85. <https://doi.org/10.1142/S0116110523400024>
- Ryu, D., Hong, J., Jo, H., 2024. Capturing locational effects: application of the K-means clustering algorithm. *The Annals of Regional Science* 73, 265–289. <https://doi.org/10.1007/S00168-024-01263-4>
- Setthasuravich, P., Kato, H., 2022. Does the digital divide matter for short-term transportation policy outcomes? A spatial econometric analysis of Thailand. *Telematics and Informatics* 72, 101858. <https://doi.org/10.1016/J.TELE.2022.101858>
- Setthasuravich, P., Sirikhan, K., Kato, H., 2024. Spatial econometric analysis of the digital divide in Thailand at the sub-district level: Patterns and determinants. *Telecommunications Policy* 48 (8), 102818. <https://doi.org/10.1016/J.TELPOL.2024.102818>
- Srisaringkam, T., Aruga, K., 2025a. Economic Growth and Energy Consumption in Thailand: Evidence from the Energy Kuznets Curve Using Provincial-Level Data. *Energies* 18 (15), 3980. <https://doi.org/10.3390/EN18153980>
- Srisaringkam, T., Aruga, K., 2025b. The Spatial Impact of PM2.5 Pollution on Economic Growth from 2012 to 2022: Evidence from Satellite and Provincial-Level Data in Thailand. *Urban Science* 9 (4), 110. <https://doi.org/10.3390/URBANSCI9040110>
- Su, J., Ma, Z., Wang, Y., Wang, X., 2023. Evaluation and Spatial Correlation Analysis of Green Economic Growth Efficiency in Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Sustainability* 15 (3), 2583. <https://doi.org/10.3390/SU15032583>
- Tipayalai, K., Mendez, C., 2024. Regional convergence and spatial dependence in Thailand: global and local assessments. *Journal of the Asia Pacific Economy* 29 (2), 693–720. <https://doi.org/10.1080/13547860.2022.2041286>
- Tu, X., Fu, C., Huang, A., Chen, H., Ding, X., 2022. DBSCAN Spatial Clustering Analysis of Urban “Production–Living–Ecological” Space Based on POI Data: A Case Study of Central Urban Wuhan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (9), 5153. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19095153>
- Vaňová, A., Vaňová, V., Nevima, J., Taecharungroj, V., 2024. Which Economic Sectors Influence Average Household Income? A Spatial Econometric Study of Thailand’s 76 Provinces. *Economics* 12 (2), 36–61. <https://doi.org/10.3390/ECONOMIES12020036>
- Wheway, C., Punmanee, T., 2020. Global production networks and regional development: Thai regional development beyond the Bangkok metropolis? *Regional Studies, Regional Science* 4 (1), 146–153. <https://doi.org/10.1080/21681376.2017.1333919>
- Xiao, T., Wan, Y., Jin, R., Qin, J., Wu, T., 2022. Integrating Gaussian Mixture Dual-Clustering and DBSCAN for Exploring Heterogeneous Characteristics of Urban Spatial Agglomeration Areas. *Remote Sensing* 14 (22), 5689. <https://doi.org/10.3390/RS14225689>
- Zhang, R., Sun, Y., Jiang, J., 2023. Factors Influencing the Spatial Spillovers of the Interprovincial Tourism Economy Based on Three-dimensional Distance: Evidence From China. *Sage Open* 13 (3). <https://doi.org/10.1177/21582440231194496>
- Бекетов С.М., Федяевская Д.Э., Схведиани А.Е., Редько С.Г., Бурлуцкая Ж.В. Цифровой инструмент автоматизации процессов сбора, хранения и обработки данных об инновационном развитии регионов // 2024. Экономика. Информатика. Т. 51. № 3. С. 735–748. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-3-735-748>
- Соловьев М.В., Схведиани Е., Шариков Н.И. Эконометрические исследования регионального развития: библиометрический анализ на основе открытых источников. *Управление наукой и наукометрия* // 2025. Т. 20. № 1. С. 26–45. <https://doi.org/10.33873/2686-6706.2025.20.1.26-45>

References

- Altuntas, S., Selim, S., Altuntas, F., 2022. A hierarchical clustering based panel data approach: A case study of regional incentives. *International Journal of Information Management Data Insights* 2 (2), 100098. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMEI.2022.100098>
- Beketov, S.M., Fedyaevskaya, D.E., Skhvediani, A.E., Redko, S.G., Burlutskaya, Zh.V., 2024. A Digital Tool for Automating the Processes of Collecting, Storing and Processing Data on the Innovative Development of Regions. *Economics. Information Technologies* 51 (3). <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-3-735-748>

- Cerqueti, R., Maranzano, P., Mattera, R., 2024. Spatially-Clustered Spatial Autoregressive Models with Application to Agricultural Market Concentration in Europe. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics* 30, 431–465. <https://doi.org/10.1007/s13253-024-00672-4>
- Chutiphongdech, T., Tangtamaruk, P., Aksornat, A., Tovara, S., Daengmeese, S., Siwarepan, N., 2025. Sport event hosting and provincial economic growth: Evidence from the Bangsaen21 Half Marathon in Thailand. *Humanities and Social Sciences Communications* 12, 1098. <https://doi.org/10.1057/S41599-025-05494-4>
- de Campos, A.C., Lopes, L., Carreira, C., 2024. Spatial Autocorrelation of Exports and R&D Expenditures in Portugal. *Journal of the Knowledge Economy* 15, 8632–8653. <https://doi.org/10.1007/S13132-023-01425-3>
- Homsombat, W., Wrasai, P., Benjabutr, N., 2025. Measuring the impact of creative city attributes on regional economic development in Thailand. *Asia-Pacific Journal of Regional Science* 9, 357–385. <https://doi.org/10.1007/S41685-025-00374-W>
- Hutasavi, S., Chen, D., 2024. Exploring the industrial growth and poverty alleviation through space-time data mining from night-time light images: a case study in Eastern Economic Corridor (EEC), Thailand. *International Journal of Remote Sensing* 45, 7803–7825. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2112111>
- Kantachote, K., Wiroonsri, N., 2023. Octa-Cluster: Different Perspectives on Quality of Life in Thailand. *Sage Open* 13 (4). <https://doi.org/10.1177/21582440231218501>
- Khemthong, S., Luenam, P., Frank, T.D., Ingsrisawang, L., 2024. Identifying the determinants of tourism receipts of Thailand and relevant determinant-determinant interactions. *PLoS One* 19, e0308153. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0308153>
- Mathrani, A., Wang, J., Li, D., Zhang, X., 2023. Clustering Analysis on Sustainable Development Goal Indicators for Forty-Five Asian Countries. *Sci* 5 (2), 14. <https://doi.org/10.3390/SCI5020014>
- Park, S., Han, S., Ahn, D., Kim, J., Yang, J., Lee, S., Hong, S., Kim, J., Park, S., Yang, H., Cha, M., 2022. Learning Economic Indicators by Aggregating Multi-Level Geospatial Information. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36 (11), 12053–12061. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i11.21464>
- Pastpipatkul, P., Ko, H., 2025. The Efficacy of Monetary and Fiscal Policies on Economic Growth: Evidence from Thailand. *Economies* 13 (1), 19. <https://doi.org/10.3390/ECONOMIES13010019>
- Pelsa, I., Balina, S., 2022. Development of economic theory – from theories of economic growth and economic development to the paradigm of sustainable development. *DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting* 7 (1), 91–101. <https://doi.org/10.17818/DIEM/2022/1.10>
- Puttanapong, N., Luenam, A., Jongwattanakul, P., 2022. Spatial Analysis of Inequality in Thailand: Applications of Satellite Data and Spatial Statistics/Econometrics. *Sustainability* 14 (7), 3946. <https://doi.org/10.3390/SU14073946>
- Puttanapong, N., Prasertsoong, N., Peechapat, W., 2023. Predicting Provincial Gross Domestic Product Using Satellite Data and Machine Learning Methods: A Case Study of Thailand. *Asian Development Review* 40 (2), 39–85. <https://doi.org/10.1142/S0116110523400024>
- Ryu, D., Hong, J., Jo, H., 2024. Capturing locational effects: application of the K-means clustering algorithm. *The Annals of Regional Science* 73, 265–289. <https://doi.org/10.1007/S00168-024-01263-4>
- Setthasuravich, P., Kato, H., 2022. Does the digital divide matter for short-term transportation policy outcomes? A spatial econometric analysis of Thailand. *Telematics and Informatics* 72, 101858. <https://doi.org/10.1016/J.TELE.2022.101858>
- Setthasuravich, P., Sirikhan, K., Kato, H., 2024. Spatial econometric analysis of the digital divide in Thailand at the sub-district level: Patterns and determinants. *Telecommunications Policy* 48 (8), 102818. <https://doi.org/10.1016/J.TELPOL.2024.102818>
- Soloviev, M.V., Shvediani, A.E., Sharikov, N.I., 2025. Econometric Studies of Regional Development: Bibliometric Analysis Based on Open Sources. *Science Governance and Scientometrics* 20 (1), 26–45. DOI: <https://doi.org/10.33873/2686-6706.2025.20-1.26-45>
- Srisaringkam, T., Aruga, K., 2025a. Economic Growth and Energy Consumption in Thailand: Evidence from the Energy Kuznets Curve Using Provincial-Level Data. *Energies* 18 (15), 3980. <https://doi.org/10.3390/EN18153980>
- Srisaringkam, T., Aruga, K., 2025b. The Spatial Impact of PM2.5 Pollution on Economic Growth from 2012 to 2022: Evidence from Satellite and Provincial-Level Data in Thailand. *Urban Science* 9 (4), 110. <https://doi.org/10.3390/URBANSCI9040110>
- Su, J., Ma, Z., Wang, Y., Wang, X., 2023. Evaluation and Spatial Correlation Analysis of Green Economic Growth Efficiency in Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Sustainability* 15 (3), 2583. <https://doi.org/10.3390/SU15032583>
- Tipayalai, K., Mendez, C., 2024. Regional convergence and spatial dependence in Thailand: global and local assessments. *Journal of the Asia Pacific Economy* 29 (2), 693–720. <https://doi.org/10.1080/13547860.2022.2041286>
- Tu, X., Fu, C., Huang, A., Chen, H., Ding, X., 2022. DBSCAN Spatial Clustering Analysis of Urban “Production–Living–Ecological” Space Based on POI Data: A Case Study of Central Urban Wuhan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (9), 5153. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19095153>
- Vaňová, A., Vaňová, V., Nevima, J., Taecharungroj, V., 2024. Which Economic Sectors Influence Average Household Income? A Spatial Econometric Study of Thailand’s 76 Provinces. *Economies* 12 (2), 36–61. <https://doi.org/10.3390/ECONOMIES12020036>
- Wheway, C., Punmanee, T., 2020. Global production networks and regional development: Thai regional development beyond the Bangkok metropolis? *Regional Studies, Regional Science* 4 (1), 146–153. <https://doi.org/10.1080/21681376.2017.1333919>
- Xiao, T., Wan, Y., Jin, R., Qin, J., Wu, T., 2022. Integrating Gaussian Mixture Dual-Clustering and DBSCAN for Exploring Heterogeneous Characteristics of Urban Spatial Agglomeration Areas. *Remote Sensing* 14 (22), 5689. <https://doi.org/10.3390/RS14225689>
- Zhang, R., Sun, Y., Jiang, J., 2023. Factors Influencing the Spatial Spillovers of the Interprovincial Tourism Economy Based on Three-dimensional Distance: Evidence From China. *Sage Open* 13 (3). <https://doi.org/10.1177/21582440231194496>

Статья поступила в редакцию 18.05.2025, одобрена после рецензирования 27.05.2025, принята к публикации 07.06.2025.

The article was submitted 18.05.2025, approved after reviewing 27.05.2025, accepted for publication 07.06.2025.

Информация об авторах:

1. Никита Шариков, Магистр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0004-0481-712X>, sharikov.ni@edu.spbstu.ru

2. Полина Полякова, Руководитель направления, ООО «Газпромнефть Информационно-Технологический оператор», Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0000-6644-370X>, polyakova_p00@mail.ru
3. Арсений Кудрявцев, Специалист, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0001-1024-9091>, arseny.kudryavtzev@yandex.ru

About the authors:

1. Nikita Sharikov, Master, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0004-0481-712X>, sharikov.ni@edu.spbstu.ru
2. Polina Poliakova, LLC Gazpromneft Information Technology Operator, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0000-6644-370X>, polyakova_p00@mail.ru
3. Arsenii Kudryavtsev, researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0001-1024-9091>, arseny.kudryavtzev@yandex.ru