

# Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал  
№ 4 (129)/2025 Том 1

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

- **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

- **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

- **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

- **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.

# СОДЕРЖАНИЕ

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

**Smirnov A.**

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE TRANSFORMATION OF MONOLITHIC SYSTEMS INTO MICROSERVICES ARCHITECTURE: ANALYSIS OF STRATEGIES, POTENTIAL RISKS, AND MITIGATION METHODS.....3

**Topalidi A.**

OPTIMIZATION OF CACHING PROCESSES IN RUBY-BASED APPLICATIONS: THE IMPACT OF CACHING STRATEGIES ON PERFORMANCE .....7

## ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Масалович В.Г.**

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА КВАНТОВОГО МИРА.....11

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Nguyen Thanh Chinh, Nguyen Khac Tung, Tran Van Duc, Nguyen Cong Chung**

A NEW PROPOSAL FOR DIRECTION FINDING IN CASE OF PROPELLER-EQUIPPED MARINE TARGETS Abstract .....16

**Yarov Y.**

STRUCTURAL SOLUTIONS FOR ENSURING SEISMIC RESILIENCE OF COMMERCIAL AND RESIDENTIAL BUILDINGS IN HIGHLY SEISMICALLY ACTIVE REGIONS OF THE U.S. ....23

**Арутинян Э.Р.**

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕМОНТА ВМЕСТО ЗАМЕНЫ В КОММЕРЧЕСКОМ ХОЛОДИЛЬНОМ ОБСЛУЖИВАНИИ .....27

**Вохров Р.А.**

СТРАТЕГИИ АДАПТАЦИИ SAP ММ-СПЕЦИАЛИСТОВ К ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ERP-ПЛАТФОРМАМ .....34

**Кауко**

СОВРЕМЕННЫЕ РОССИЙСКИЕ УНИВЕРСИТЕТЫ – ФОРМЫ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА. ....39

**Кауко**

ФОРМИРОВАНИЕ АМЕРИКАНСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ. ....40

**Сакаева О.В.**

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В СЕТЯХ ЧЕТВЁРТОГО И ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЙ.....41

**Khomutinnikov M.**

RESEARCH ON THE INTEGRATION OF AI AGENTS INTO A DYNAMIC WAF MODEL FOR ADAPTIVE PROTECTION OF WEB APPLICATIONS .....48

**Trung Thanh Nguyen**

PERFORMANCE OF DIGITAL MODULATION SIGNALS OVER COMMUNICATION SYSTEMS .....54

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

UDC 004.42

---

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE TRANSFORMATION OF MONOLITHIC SYSTEMS INTO MICROSERVICES ARCHITECTURE: ANALYSIS OF STRATEGIES, POTENTIAL RISKS, AND MITIGATION METHODS

---

*Smirnov A.*

*Master's degree, Perm National Research Polytechnic University,  
Russia, Perm*

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ТРАНСФОРМАЦИИ МОНОЛИТНЫХ СИСТЕМ В МИКРОСЕРВИСНУЮ АРХИТЕКТУРУ: АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РИСКОВ И СПОСОБОВ ИХ МИНИМИЗАЦИИ

*Смирнов А.В.*

*магистр,*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, РФ, г. Пермь РЭУ  
имени Г.В. Плеханова, г. Москва*

This article explores the process of migrating from monolithic architecture to microservices. It examines key approaches such as the Strangler Pattern and modular decomposition, along with their respective advantages and limitations in the context of various system types. It focuses on how these strategies can be applied to effectively decompose monolithic systems into independent services. Particular attention is given to challenges related to data migration and transaction management in distributed systems. The analysis addresses potential difficulties in transferring data, synchronizing state, and managing inter-service dependencies. It also considers risk mitigation strategies and approaches for ensuring data consistency and integrity throughout the migration process.

В данной статье исследуется процесс миграции от монолитной архитектуры к микросервисам. Рассматриваются основные подходы, такие как Strangler Pattern и модульная декомпозиция, а также их преимущества и ограничения в контексте различных типов систем. Основное внимание уделяется тому, как эти стратегии могут быть применены для эффективной декомпозиции монолитных систем в независимые сервисы. Особое внимание уделяется проблемам, связанным с миграцией данных и управлением транзакциями в распределенных системах. Анализируются возможные сложности в процессе переноса данных, синхронизации состояний и управлении зависимостями между сервисами. Рассматриваются способы минимизации этих рисков, а также подходы к обеспечению согласованности и целостности данных.

**Keywords:** migration, monolithic architecture, microservices, Strangler Pattern, modular decomposition, system decomposition, data migration, transaction management.

**Ключевые слова:** миграция, монолитная архитектура, микросервисы, Strangler Pattern, модульная декомпозиция, декомпозиция системы, миграция данных, управление транзакциями.

#### Introduction

The shift from monolithic applications towards microservices is a major step forward for many organizations to boost the reactivity of their IT frameworks. This switch holds potential in optimizing development operations alongside faster release of products. Moving from a monolithic architecture towards a microservices environment still requires serious planning and putting in place successful strategies. Without proper methodologies in place, the process would involve significant trouble in the form of performance hindrances, increased complexity in handling data, as well as vulnerabilities in security.

One main hurdle in the migration process is selecting the appropriate strategy. Of the multiple methodologies suggested, the Strangler Pattern and the modular decomposition stand out as explicitly being the most common choices. Both of these approaches allow the system to switch over from being monolithic to microservices slowly, thus alleviating risks during

transformation and boosting the efficiency of the overall system. However, both methods also have certain shortcomings that need to be overcome through the planning stage of migration, especially with reference to the process of dividing the system into separate services and carrying out data migration.

The goal of this research is to analyze various strategies for migrating monolithic systems to microservices architecture, including the Strangler Pattern and modular decomposition, while identifying the primary risks associated with the process of system decomposition and data migration. The relevance of this work lies in the growing interest in microservices architecture as a means to improve the scalability and flexibility of IT systems. The research methods include an analysis of existing theoretical migration models, as well as a review of practical cases based on real-world examples of both successful and unsuccessful migrations.

Main part. Migration strategies from monolithic systems to microservices architecture

The transition from monolithic architecture is a compound process that requires a clear understanding of both technical aspects and business needs. Incorporating microservices in an IT system allows for greater flexibility and component independence, which accelerates development and simplifies updates. According to a worldwide 2023 report [1], nearly three-quarters (74%) of surveyed organizations are already utilizing microservices architecture. This accentuates

its widespread adoption across industries and its perceived value in enabling modern, adaptable systems. The process in question is full of many problems, including the proper selection of a migration strategy, risk assessment, and system integrity maintenance during the transition period. As opposed to monolithic architecture, where all the pieces are combined into a single deployable unit, microservices architecture breaks these pieces down into independent deployable services with each being allocated an explicit functional responsibility (fig. 1).

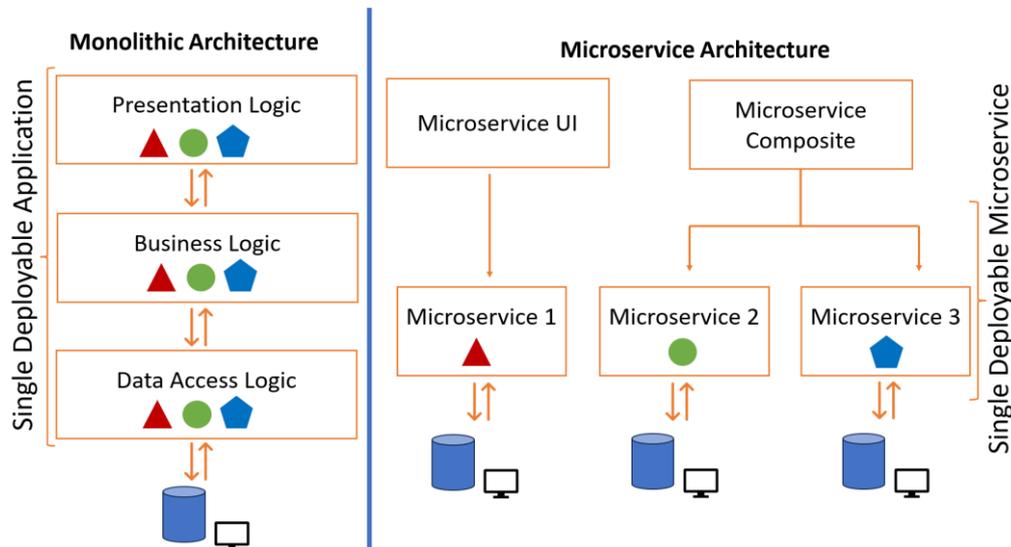


Figure 1. Monolithic vs microservice architecture [2]

One of the most potent strategies for relocation is the **Strangler Pattern**. This approach involves the gradual replacement of parts of the existing monolith with new microservices. The idea is not to rewrite the entire system at once but to implement microservices incrementally and run parallel with the existing monolith. New functionalities are initially developed as microservices that can coexist with the old code. Over time, the old parts of the monolith are gradually «strangled», meaning their functionality is fully replaced by microservices, and eventually, the monolith is completely phased out of operation [3].

The key characteristic of the Strangler Pattern is its incremental nature. This approach reduces the risk of failures and provides greater flexibility in managing the migration process. Organizations can test and deploy microservices as needed while maintaining interaction between legacy and new system components. This strategy is particularly advantageous when the monolith is too complex for immediate refactoring, and there is no straightforward way to decommission the existing system without disrupting functionality.

Unlike the incremental approach of the Strangler Pattern, **modular decomposition** is a more direct method focused on breaking the monolith into independent modules, which can then be converted into microservices. This process assumes that the monolithic system is initially divided into smaller but functionally related modules. Each module is subsequently transformed into a standalone service

with its own application programming interface (API), database, and data processing mechanisms [4]. Unlike the Strangler Pattern, which operates alongside an active monolithic system, modular decomposition may require more significant modifications to the codebase in the early stages of migration.

Modular decomposition works on the assumption that every module of a system has well-defined boundaries and runs independently of the other parts in the application. This approach is found to be most beneficial when the system is already structured so that the codebase can be systematically split into distinct entities. It does also require serious work to clearly define module boundaries and to avoid needless interdependencies. If dependencies between modules grow uncontrollably, the migration process may become prolonged, significantly reducing the efficiency of the transition.

One of the core aspects of the different migration approaches is the architectural design determining the interaction patterns between components. In considering a choice between the Strangler Pattern and modular decomposition, it is central to take intentional decisions concerning the communication modes that microservices will use between themselves and the existing components of the monolithic system. This entails defining suitable communication protocols like REST API or gRPC and the creation of data and transactional frameworks to ensure the integrity and consistency of the system.

Both the Strangler Pattern and modular

decomposition have distinct strengths and weaknesses. The Strangler Pattern is particularly suitable for complex and large-scale monolithic applications where a phased migration is necessary to minimize risks. The latter may be a more viable option for systems with an already well-structured or logically segmented architecture. This also suits a case when a more radical transition is required from the outset. The final choice of strategy depends on various factors, including system size and complexity, or migration time constraints.

As follows, main factors influencing the choice of migration strategy contain the necessary transition timeline, the degree of interdependence among system components, and the technical capabilities of the development team. Each strategy presents distinctive advantages and barriers that must be carefully assessed before initiating the shifting process.

Migration risks and pitfalls: system decomposition and data transition

The migration from monolithic architecture to microservices is fraught with numerous risks, particularly during the phases of system decomposition into independent services and data migration. These stages are critical, as errors at this point can significantly impact the functionality and performance of the entire system. A poorly executed migration may result in increased downtime, data loss, or complications in development and testing processes, ultimately affecting the company's business operations [5].

To mitigate the risk of poorly defined service boundaries, several decomposition methods have been proposed in both academic literature and industry practice. These methods offer structured guidance for breaking down a monolithic system into microservices in a way that aligns with business logic, data ownership, or user behavior (table 1).

Table 1

Common decomposition methods for microservices [6, 7]

Method	Description	Usage scenario
Domain-Driven Decomposition	Services are aligned with bounded contexts and domain models.	When clear business domains exist; suitable for complex systems.
Data-Driven Decomposition	Components are defined based on ownership and access patterns of data entities.	When data ownership boundaries are well established.
Business-Capability-Based	Units are structured around high-level business capabilities or functions.	When business processes are stable and well-defined.
Actor-Based Decomposition	Services are modeled based on user roles or actors in the system.	Useful in user-centric applications with distinct roles.
Use-Case Decomposition	Independent elements are created to support specific user scenarios or workflows.	Effective during initial phases or MVP development.

One of the primary risks during system decomposition is the misalignment of service boundaries with business logic. Defining which functional blocks should be extracted into separate microservices can be very difficult. Ideally, each microservice should be self-contained and encapsulate its logic. However, in practice, clearly segmenting a monolithic application can be difficult, particularly when the system exhibits high internal coupling between components. Poorly defined service boundaries can lead to excessive dependencies, as it makes the system less flexible. If a microservice remains tightly coupled to others, modifications in one service may trigger cascading changes in multiple components.

Another significant risk involves **transaction management in a distributed system**. Monolithic transaction handling is relatively straightforward, as all data resides within a single context and allows for atomic execution. Nevertheless, in a microservices architecture, each service may maintain its own database and necessitates the implementation of complex mechanisms to keep data consistency and integrity. In such an environment, it is testing to consider distributed transactions or approaches like **eventual consistency** to prevent data unpredictability caused by transmission.

**Data migration** between monolithic and microservices architectures represents one of the most

challenging aspects of the transition process. Beyond planning for data storage in new services, ensuring the correctness of data migration is critical. Issues may arise when synchronizing data between the legacy system and newly introduced microservices while both are operating in parallel [8]. In such cases, **data versioning** and migration processes must be carefully managed to minimize disruptions. Ideally, migration should be performed with zero data loss, and all schema modifications should be retroactively applicable to legacy data, a particularly complex task for large-scale and actively utilized systems. Furthermore, scalability challenges may arise during the data migration phase.

**Service dependencies** can also pose significant challenges during migration. The dependency relationships between monolithic components are often implicit and hard to determine. Although, in a microservices architecture, it is in all respects important that each dependency be well-defined and systematically managed. Though external dependencies like interactions with other services or third-party API are influential, internal dependencies are also equally weighty because they could lead to undue coupling between the services. Omissions or ambiguity in defining dependencies can lead to serious complexities like cyclic dependencies, which can hamper the system's long-term development badly.

Equally critical is **state and session management**. In conventional application structure,

sessions are often stored centrally. This simplifies user data handling and authentication processes. Yet, in decentralized application architectures, session data and state may be distributed across multiple services, necessitating new approaches to session management. Potential solutions include centralized session storage or token-based mechanisms, such as cookies and JWT.

Another major challenge is **API versioning and change management**. As microservices are frequently updated during migration, maintaining compatibility with existing services and clients becomes essential. Poorly managed versioning or uncontrolled API modifications can lead to system failures, particularly if versioning policies are not established in advance.

Migration problems associated with system decomposition and data migration necessitate thorough planning and analysis. Implementing strategies to reduce possible risks, such as robust dependency management, transaction control, or state synchronization, can substantially improve the likelihood of a successful transition while minimizing disruptions in the migration process.

#### Conclusion

The process of migrating from monolithic to microservices-based architecture is a subtle task that stands in need of detailed planning and a methodical approach at every step. Both techniques, the Strangler Pattern and decomposition by modules, have unique benefits and drawbacks. The best choice between them depends on the inherent characteristics of the existing system, the scale of the required changes, and the relevant technical standards. Beyond technical considerations, it is quite important to take organizational and business constraints into account because these can go a long way in determining the success of the relocation process.

Successful deployment of a microservices architecture requires careful architectural planning and a proactive approach to dependency and system integration risk management. Deficiencies in these key areas will lead to severe operational disruptions, increased migration costs, and degraded performance metrics. However, by following a systematically structured approach and taking a comprehensive review of potential pitfalls, the actualization of a microservices

architecture has the potential to greatly enhance the flexibility, scalability, and resilience of an information technology infrastructure, opening up new opportunities for innovation and business growth.

#### References

1. **Microservices Architecture: Have Engineering Organizations Found Success? / Gartner** // URL: <https://www.gartner.com/peer-community/oneminuteinsights/omi-microservices-architecture-have-engineering-organizations-found-success-u6b> (date of access: 10.03.2025).
2. **Velepucha V., Flores P. A Survey on Microservices Architecture: Principles, Patterns and Migration Challenges.** 2023. P. 1-1.
3. **Oyeniran C.O., Adewusi A.O., Adeleke A.G., Akwawa L.A., Azubuko C.F. Microservices architecture in cloud-native applications: Design patterns and scalability** // *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. Vol. 5. № 9. P. 2107-24.
4. **Abgaz Y., McCarren A., Elger P., Solan D., Lapuz N., Bivol M., Jackson G., Yilmaz M., Buckley J., Clarke P. Decomposition of monolith applications into microservices architectures: A systematic review** // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2023. Vol. 49. № 8. P. 4213-42.
5. **Dudak A. Microservice architecture in frontend development** // *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2024. № 145. P. 99-102.
6. **Borodin I. Methodological approaches in construction project management: a comparative analysis of Agile and Waterfall methodologies** // *Cold Science*. 2024. № 12. P. 48-55.
7. **Said M.A., Ezzati A., Mihi S., Belouaddane L. Microservices adoption: An industrial inquiry into factors influencing decisions and implementation strategies** // *International Journal of Computing and Digital Systems*. 2024. Vol. 15. № 1. P. 1417-32.
8. **Velepucha V., Flores P. Monoliths to microservices-migration problems and challenges: A SMS** // *In2021 Second International Conference on Information Systems and Software Technologies (IC12ST)*. 2021. P. 135-142.

---

OPTIMIZATION OF CACHING PROCESSES IN RUBY-BASED APPLICATIONS: THE IMPACT OF CACHING STRATEGIES ON PERFORMANCE

---

*Topalidi A.*

*specialist degree,*

*Moscow State University of Geodesy and Cartography,*

*Moscow*

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КЭШИРОВАНИЯ В ПРИЛОЖЕНИЯХ НА БАЗЕ RUBY:  
ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИЙ КЭШИРОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**

*Топалиди А.В.*

*специалист,*

*Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии,*

*г. Москва*

This article explores the impact of caching strategies on the performance of web applications built with Ruby. Key caching approaches, including page caching, action caching, and fragment caching, are examined. Factors influencing caching efficiency, such as data update frequency, key-based invalidation, and the use of external storage solutions like Redis and Memcached, are analyzed. The effects of different caching methods on data processing latency and information consistency are studied. Optimization techniques for caching processes, including a combined approach and nested caching, are considered.

В данной статье исследуется влияние стратегий кэширования на производительность веб-приложений, разработанных на базе Ruby. Рассматриваются ключевые подходы кэширования, включая page caching, action caching и fragment caching. Анализируются факторы, влияющие на эффективность кэширования, такие как частота обновления данных, использование key-based invalidation и применение внешних хранилищ, таких как Redis и Memcached. Изучается влияние различных методов кэширования на задержки при обработке данных и согласованность информации. Рассматриваются способы оптимизации процессов кэширования, включая комбинированный подход и вложенное кэширование (Russian Doll Caching).

**Keywords:** caching, web application performance, page caching, action caching, fragment caching, data processing delays, key-based invalidation.

**Ключевые слова:** кэширование, производительность веб-приложений, кэширование страниц, кэширование действий, кэширование фрагментов, задержки обработки данных, инвалидация кэша на основе ключей.

#### Introduction

In modern Ruby-based web applications, caching is an essential performance-enhancement method and server load reduction. Proper caching reduces database query counts, accelerates web page rendering, and reduces application response time. However, a good caching strategy relies on many factors such as application design, workload, and data freshness.

Among the most common caching methodologies used in Ruby applications include page caching, action caching, and fragment caching. All of these methodologies have distinguishing features, particular usage, and varied effects on system-wide performance. Poor implementation or usage of a caching method can lead to increased latency, stale

information, and ineffective utilization of resources. It is thus important to conduct a critical assessment of how different caching strategies affect application efficiency and data processing latency. The goal of this research is to examine key caching strategies in Ruby applications, assess their impact on performance, and identify the most effective approaches for optimizing web services.

Main part. Caching approaches in Ruby applications

The incorporation of caching in web applications is essential to reduce server loads, decrease query frequency to the database, and improve response times. Caching strategies in use within the Ruby community provide a rich variety of strategies for precomputing and using data with low overhead for processing. A good caching approach depends on the specific characteristics of the application, data consistency requirements, and granularity used in caching.

**Page caching** is a technique in which the server stores fully generated HTML pages and serves them without making requests to the backend. This approach is particularly effective for static pages, as it eliminates the need for application server and database processing altogether. In Ruby on Rails, page caching is implemented by saving HTML files in the public directory (public/), allowing web servers such as Nginx or Apache to serve them directly.

One of the strongest aspects of page caching is that it has extremely high-speed processing due to the fact that it reduces request processing to serving a previously created file. This method does have one extremely serious limitation: it will not function with dynamic pages with personalized data or data that needs to be updated in real-time. If content on a cached

page does get altered, the cache will need to be manually invalidated or invalidated programmatically so that outdated data won't be displayed.

**Action caching** offers a more flexible approach by storing the result of a specific controller action. Unlike page caching, this method accounts for user authentication, as requests still pass through the authentication mechanism before the cached response is served [1]. With action caching, the server stores the controller's output and reuses it for similar requests. This approach reduces the overhead of HTML generation while still preserving standard routing and security mechanisms. However, one of its drawbacks is the need for precise cache invalidation configuration when data affecting the cached content is updated.

Action caching is particularly useful in scenarios where most of a page remains static but requires authentication before being displayed. This is commonly applied in personalized dashboards or restricted-access pages that do not change frequently.

**Fragment caching** allows for the caching of some sections of a page rather than the entire page. This technique proves to be most effective for dynamic pages, whereby some of the content remains unchanged but other sections are updated time and again. Fragment caching in Ruby on Rails is facilitated through the use of the cache method, which wraps specific blocks of templates within the caching system. The system stores cached versions of these fragments and reuses them

during page rendering. This significantly reduces server load, particularly when fragments contain computationally expensive data, such as complex SQL queries or API calls. An example in `views/products/index.html.erb`:

```
<% @products.each do |product| %>
  <% cache product do %>
    <div class="product">
      <h2><%= product.name %></h2>
      <p><%= product.description %></p>
    </div>
  <% end %>
<% end %>
```

Upon the first request to the page, a separate cache fragment is created for each product, stored in the cache storage, and utilized for subsequent requests. If the object's data changes, such as an update to the `updated_at` attribute, the corresponding cache is automatically invalidated, preventing the display of outdated information. This approach significantly reduces server load, as re-rendering affects only the modified elements rather than the entire page. Developer case studies confirm that the implementation of fragment caching significantly reduces page rendering time [2]. Specifically, according to the presented data, the processing time without caching is 6094 ms, whereas after applying fragment caching, it decreases to 25 ms (fig. 1).

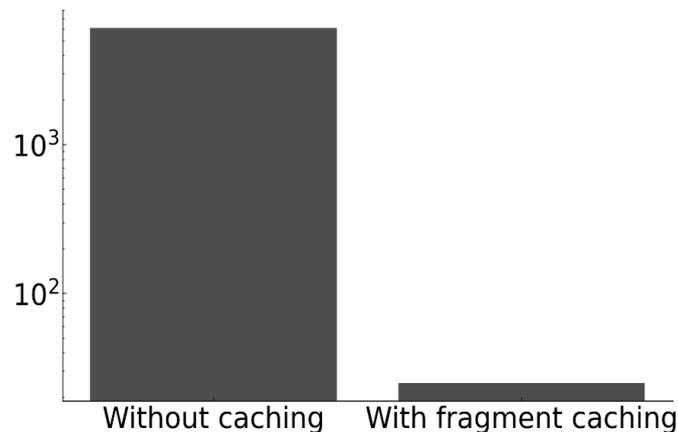


Figure 1. Impact of fragment caching on page rendering time in Ruby on Rails, ms log scale

The primary challenge of fragment caching lies in cache expiration management. A common solution is **key-based invalidation**, where cache keys are generated based on the data that influences their content. Another important technique is **database-level caching**. ActiveRecord supports a built-in **query caching** mechanism, which stores the results of repeated SQL queries within a single session [3]. This reduces the number of database requests and improves the execution speed of complex queries.

The optimal choice of a caching method depends on the specific requirements of the application. If a web page is primarily static and does not require personalization, **page caching** is the most effective solution. When authentication must be considered while avoiding repeated content rendering, **action caching** may be more suitable. In scenarios where certain page elements remain unchanged while others are frequently updated, **fragment caching** is the preferred approach (table 1).

Table 1.

Analysis of caching methods [4, 5]

Method	When to use	Advantages	Limitations
Page caching	Static pages.	Maximum speed.	Does not support dynamic content.
Action caching	Pages with authentication.	Faster than full rendering.	Does not cache individual elements.
Fragment caching	Dynamic pages with repeating elements.	Flexibilit, independent cache updates.	Requires a well-thought-out invalidation strategy.

Maintaining a balance between performance and data freshness is crucial. Excessive caching without a well-designed invalidation mechanism can result in outdated information, whereas insufficient caching may fail to provide a significant performance improvement. Therefore, developers must carefully analyze workload characteristics and data update dynamics before implementing specific caching strategies.

The impact of caching strategies on performance and latency

The efficiency of web applications is largely determined by request processing speed and server response time. Under high-load conditions, particularly with a large number of concurrent users, caching strategies significantly influence these performance metrics. The implementation of various caching methods reduces the number of database queries, decreases computational load on the server, and enhances application stability. However, beyond these benefits, it is crucial to consider potential latencies caused by cache staleness, as well as the impact of the chosen caching method on data consistency.

An important consideration for caching effectiveness is how often data is updated. For environments in which content is updated infrequently, caching a full page or large chunks can provide significant improvements in loading times and reduced server load [6]. However, in environments with frequent updates to content, caching can result in stale information, and thus cache invalidation or refreshing strategies will have to be employed. For use in applications like real-time analytics dashboards or e-commerce sites with continuously changing information, ineffective caching can mean slow updates to measures, eventually causing a distortion in what is reported as the system's current state.

Data processing delays can be caused by ineffective cache management, particularly if achieved through time-expiration. If the stale cache data is still used right up to the point of expiration, users will be faced with stale data. Updating the cache too often, though, can render the use of caching totally useless because recreating cached data itself requires a significant amount of computing resources. In large-scale Ruby on Rails applications, an inefficient caching configuration may result in the system consuming more resources on cache management than on processing actual requests.

One of the most effective strategies for mitigating caching-related delays is **key-based invalidation**, where a unique cache key is generated based on values that directly influence the cached content. This

approach minimizes the risk of serving outdated data, as the cache is automatically refreshed whenever the underlying information changes. In Ruby applications, this method is particularly effective for **fragment caching**, where different parts of a page can be updated independently, ensuring a more efficient and responsive caching mechanism.

The use of external tools such as **Redis** and **Memcached** also has a significant impact on performance. These systems store cached data in memory, providing near-instant access [7]. However, their efficiency largely depends on configuration and cache size management policies. If memory is insufficient or eviction policies are improperly configured, latency may increase as the system is forced to retrieve data from the database more frequently to replenish the cache. To use Redis for caching, it is necessary to configure the appropriate `cache_store`. Starting from Rails 5.2, built-in support for Redis caching is available within the framework. The configuration in `config/environments/production.rb` is as follows:

```
config.cache_store = :redis_cache_store, { url: 'redis://localhost:6379/1' }
```

On the first request, an SQL query is executed, and its result is stored in the Redis cache. Subsequent requests within the specified expiration time (`expires_in`) retrieve data directly from the cache, reducing the load on the database [8].

The greatest performance gains are achieved through a combined approach to caching strategies. Striking an optimal balance between page caching, action caching, and fragment caching helps minimize delays while preserving data freshness. One such technique is **nested caching (Russian Doll Caching)**, a nested caching approach in which different fragments of a page are cached at multiple levels [9]. This allows cached data to be reused even when certain parts of the page change. This approach is particularly effective when working with composite UI elements, where updating a single component does not require regenerating the entire cache.

The selection of an optimal caching strategy depends on the application's architecture and the workload it handles. In high-load systems that process large volumes of user data, caching can significantly reduce response times. It is also essential to consider potential trade-offs between performance and data freshness. This is important because excessive caching without a well-designed invalidation mechanism may lead to outdated information, ultimately compromising user trust.

### Conclusion

Optimizing caching processes in Ruby applications plays a crucial role in improving performance, reducing server load, and providing rapid system response. Various caching strategies, including page caching, action caching, and fragment caching, enable efficient management of computational resources. However, their selection must consider the nature of the data and its update dynamics. A combined approach that incorporates key-based invalidation, external storage solutions (Redis, Memcached), and nested caching minimizes data processing latency while maintaining a balance between system speed and data freshness.

Despite its significant advantages, caching requires serious thought in terms of application design and corresponding risks. Excessive caching, in the absence of a proper invalidation process, can lead to stale information in the cache, while too little caching can preclude substantial performance gains. Proper cache management should have a dynamic approach to account for rates of updates in content, workload behavior, and system constraints. Developing an effective caching strategy not only enhances user satisfaction but ensures reliable performance for Ruby-based web services in heavy loads

### References

1. Yu Q., Yin J., Yang L., Pei J., Sun B. Implementation and Simulation of Ruby Framework of Employment Diagnosis and Analysis Platform // In2022 Second International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS). 2022. P. 954-957.
2. Fragment Caching with Rails 5.1 / Medium // URL: <https://medium-com-wintermeyer-fragment-caching-with-rails-26476fc2a985> (date of access: 25.04.2025).
3. Baklanov I. Adaptive machine learning algorithms for stream data processing // Professional Bulletin: Information Technology and Security. 2024. №3/2024. P. 3-7.
4. Bolgov S. Automation of business processes using integration platforms and backend technologies // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024. Vol. 6. № 12. P. 3847-3851.
5. Caching with Rails: An Overview / Rails Guides // URL: [https://guides.rubyonrails.org/caching\\_with\\_rails.html](https://guides.rubyonrails.org/caching_with_rails.html) (date of access: 28.04.2025).
6. Blazhkovskii A. Optimization of mobile application performance: modern approaches and methods // ISJ Theoretical & Applied Science. 2024. Vol. 140. № 12. P. 290-294.
7. Jani Y. Optimizing database performance for large-scale enterprise applications // International Journal of Science and Research (IJSR). 2022. Vol. 11. № 10. P. 1394-6.
8. How to use Redis for Query Caching / Redis // URL: <https://redis.io/learn/howtos/solutions/microservices/caching> (date of access: 03.04.2025).
9. Kumar E.S., Kesavan S., Naidu R.C. Comprehensive analysis of cloud based databases // InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1131. № 1. P. 012021.

# ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 53

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА КВАНТОВОГО МИРА.

Масалович В.Г.

### АННОТАЦИЯ

Состояния однородного изотропного пространства, от вакуума до появления вещественных частиц, исследуется с помощью согласованных систем фундаментальных физических констант и единиц измерения. Вычисленные квантовые параметры и свойства пространства-материи определяют физические модели и свойства элементарных частиц. При последовательном рассмотрении перехода от простых к сложным частицам и взаимодействиям складывается общая картина физического мира, уточняются фундаментальные константы, термины и величины, прослеживается причинная взаимосвязь всех видов материи.

**Ключевые слова:** Квантовое пространство, единая материя, причинная взаимосвязь.

На протяжении веков и тысячелетий единство реального мира многими религиозными направлениями и философскими школами осознавалось и описывалось в соответствие со своими развивающимися мистическими представлениями. Мир поражал своим бесконечным разнообразием, из-за чего никак не удавалось все факты соединить между собой общим принципом, а творящие сущности демиурги и духи стихий были выше всяческих мысленных воображений. Однако желание понять мир существует вне времени.

Современная наука рассматривает материальный мир как сложную многоуровневую развивающуюся систему взаимосвязанных материальных образований, в которой все виды материи и их связи образуют целостную систему. В пространство-временной модели Вселенной физическая материя рассматривается как непрерывная среда, равномерно заполняющая пространство и в каждый момент времени имеющая определенные значения плотности  $\rho_0$  и давления  $P_0$  [1, с. 65].

С точки зрения единства мира, всеобщей связи объектов и явлений, общей формой выражающей существование материи является пространство. Предпринятые на основе различных теорий и гипотез попытки связать и объединить все известные фундаментальные взаимодействия и все частицы в одно целое пока не привели к удовлетворительному результату. Даже на первоначальном этапе подхода к этой задаче выявились чрезвычайные трудности при построении моделей вакуума, элементарных частиц, в понимании природы движения, массы, явлений гравитации и электричества.

В новой работе для решения этой проблемы на роль первичной материи, всех явлений и видов организации материи возвращают эфир. Евклидово эфирное пространство представляется из множества условных одинаковых неподвижных ячеек, являющихся минимальными частицами пространства. Ячейка с объемом  $\lambda_{\text{мин}}^3$  и массой  $m_{\text{п}}$ , как неделимое целое, вмещает в себя элементарный

эфирный вихрь с окружающим его неподвижным неструктурированным эфиром [2, с. 13].

Вихрь, вращающийся вокруг своей оси с постоянной частотой оборотов  $\nu_{\text{п}}$ , представляет собой форму кругового тора похожего на сферу, который назвали торосферой. Размеры торосферы характеризуются длиной окружности  $\lambda_{\text{мин}}$  и радиусом сечения круга  $r$ . Не имея поступательного движения торосфера не обладает ни положительным ни отрицательным направлением тока, ни магнитными полюсами. Хаотично расположенные осевые направления торосфер распространяют вокруг себя постоянные равномерные силовые напряженности.

За модель пространства принимается безгранично протяженный континуум, состоящий из бесконечного числа неподвижных ячеек. Модель вакуума – это пространство, в котором нет ни одной возбужденной ячейки. Вокруг вращающихся торосфер ячеек силовые линии напряженности искривлены и удлинены. Одинаково уменьшенные воздействия напряженности торосфер на бесструктурный эфир превращает их в объект внешнего давления, который не дает системе рассыпаться.

Гравитация торосферы (как обратная напряженность) – чрезвычайно слабая сила с энергией  $< \varepsilon_{\text{мин}}$ , которая реализуется как всепроникающая сила тяготения. Все объекты живой и неживой природы являются источниками гравитации. Универсальность гравитации выражается в совершенно одинаковом воздействии на разные тела независимо от их массы, электрического заряда, химического состава и других свойств. Для гравитации справедлив принцип суперпозиции: сила тяготения, действующая на некоторую точку со стороны многих материальных точек, является векторной суммой сил от каждой из них.

На вакуум пространстве (или локальную Вселенную) могут воздействовать случайные флуктуации энергии и космического излучения. Время – параметр, определяющий порядок изменения явлений действительности. Возмущение

ячейки на бесконечной координате абсолютного времени можно принять за точку информационного настоящего, тогда бесконечное прошлое начнет отделяться от бесконечного будущего и возникает стрела времени.

Известно, что передача импульса энергетического возбуждения в вакууме по всем направлениям осуществляется без потерь с постоянной скоростью света. Вакуумное пространство характеризуется прецизионно измеренными физическими константами: параметрами электрической  $\epsilon_0$  и магнитной  $\mu_0$  проницаемости, импедансом  $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$  и скоростью распространения возмущения  $c = \sqrt{1 / \epsilon_0 \mu_0}$ .

Предполагается, что один полный оборот торосферы характеризуется постоянным квантом действия Планка  $h$  и минимальным масштабом абсолютного бесконечного времени  $\tau_{\text{мин}} = 1 / \nu_{\text{п}}$ . В электрической размерности квант действия может однозначно выражаться через минимальные заряд и магнитный поток ( $h = e \Phi_{\text{мин}}$ ). Отсюда следует, что один оборот невозбужденной торосферы потенциально обладает своим внутренним электрическим сопротивлением, равным постоянной Клитцинга  $R_K$  [2, с. 14]

$$R_K = \Phi_{\text{мин}} / e = 25812,80745 \text{ Ом} \quad (1)$$

Полный оборот торосферы может получать и передавать только минимальный квант энергии, соответствующий ее одному обороту  $\epsilon_{\text{мин}} = |h|$ . Возбуждение в вакууме переносится через ячейки по траектории бесконечной цилиндрической спирали. Процесс передачи энергии определяется внутренними свойствами бесструктурного и структурного эфира, при котором внешняя энергия воздействия преобразуются в энергию электрического потенциала

$$U_{\text{мин}} = \epsilon_{\text{мин}} / e = 4,13566770 \cdot 10^{-15} \text{ В} \quad (2)$$

Взаимодействие электрического потенциала с вращающейся торосферой генерирует электрический ток  $I_{\text{мин}}$ . Полный оборот тока, в зависимости от относительного направления, представляет собой минимальную порцию элементарного электрического заряда ( $-e$  или  $+e$ ), при этом величина  $e = |I_{\text{мин}}|$ . Ток сопровождается минимальным квантом магнитного потока  $\Phi_{\text{мин}} = |U_{\text{мин}}|$ , который позволяет определить индуктивность торосферы

$$L = \Phi_{\text{мин}} / I_{\text{мин}} = 25812,80745 \text{ Ом} \cdot \text{с} \quad (3)$$

Индуктивность увеличивает внутреннее сопротивление возбужденной торосферы до значения  $2R_K$ . Энергия, по линии, характеризуемой импедансом, передается на бесконечное расстояние без потерь. Перенос элементарного кванта энергии через ячейку всегда сопровождается одновременным преодолением полного электрического сопротивления ячейки и

сопротивления возбуждаемой торосферы. Отношение этих сопротивлений соответствует величине постоянной тонкой структуры

$$\alpha = Z_0 / 2R_K = 7,297352571 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

В квантовом пространстве энергия представляется количеством возбужденных эфирных торосфер. Переносимая энергия одного оборота торосферы  $\epsilon_{\text{мин}}$  может выражаться в размерности механической, тепловой и электромагнитной энергии

$$\epsilon_{\text{мин}} = m_{\text{мин}} c^2 = I_{\text{мин}} \Phi_{\text{мин}} = e U_{\text{мин}} = e \lambda_{\text{мин}} E_0 = e \lambda_{\text{мин}} c B_0 = k T_{\text{мин}} \quad (5)$$

$m_{\text{мин}} = \epsilon_{\text{мин}} / c^2$  – минимальная масса;  $E_0 = U_{\text{мин}} / \lambda_{\text{мин}}$  – электрическая напряженность;  $B_0 = E_0 / c$  – плотность магнитного потока;  $k = \lambda_{\text{мин}} B_0 = U_0 / c$  – константа Больцмана, представляющая собой линейную плотность магнитного потока;  $T_{\text{мин}} = \epsilon_{\text{мин}} / k = e \cdot c$  – минимальная температура, выражаемая через другие первичные размерности  $1\text{К} = 1\text{А} \cdot \text{м}$ .

Если допустить существование и воздействие на ячейку энергий меньше  $\epsilon_{\text{мин}}$ , то импульс, проходящий и не возмущающий торосферу, должен иметь скорость превышающую скорость света. Малые энергии возмущения, с их высокими скоростями, могут создавать причинно-следственные связи и участвовать в пока неизвестных процессах. Однако эти процессы в данной работе не рассматриваются, т. к. они существуют за пределами самых малых фундаментальных физических констант.

Воздействие минимальной энергии на торосферу ячейки за время  $\tau_{\text{мин}}$  по величине ничтожно и его можно не учитывать. Принимая величину массы торосферы и ее скорость вращения неизменными, параметры проницаемостей  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  тоже не изменяться. С помощью метода размерностей и подобия можно записать следующие уравнения

$$\epsilon_0 = \mathcal{E} \cdot m_{\text{п}} / c^3 \quad (6)$$

$$\mu_0 = c / \mathcal{E} \cdot m_{\text{п}} \quad (7)$$

Решив систему уравнений, определяется масса торосферы  $m_{\text{п}} = 5,455498497 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$  и коэффициент перевода электрической размерности сопротивления в механическую размерность  $\mathcal{E} = 1 \text{ Ом} = 4,372968995 \cdot 10^{21} \text{ м}^2 / \text{с}^2 \cdot \text{кг}$ . Определенные фундаментальные константы, уточненная единица массы Планка  $m_{\text{п}}$  и новый коэффициент перевода размерности  $\mathcal{E}$ , являются недостающими константами в объяснении параметрического единства мира.

Отношение масс определяет величину частоты оборотов торосферы  $\nu_{\text{п}} = m_{\text{п}} / m_{\text{мин}} = 7,399797188 \cdot 10^{42} \text{ с}^{-1}$  и помогает вычислить остальные параметры, соответствующие единицам Планка: время одного оборота торосферы  $\tau_{\text{мин}} = 1 / \nu_{\text{п}} = 1,351388389 \cdot 10^{-43} \text{ с}$ , характерная длина

ячейки  $\lambda_{\text{мин}} = \tau_{\text{мин}} \cdot c = 4,051360468 \cdot 10^{-35}$  м, кинетическая энергия вращения торосферы  $\epsilon_{\text{п}} = v_{\text{п}} \cdot \epsilon_{\text{мин}} = 4,903157527 \cdot 10^9$  Дж, температурный эквивалент энергии  $T_{\text{п}} = \epsilon_{\text{п}} / k = v_{\text{п}} \cdot T_{\text{мин}} = 3,554274073 \cdot 10^{32}$  К [3, с. 29].

После передачи энергии  $\epsilon_{\text{мин}}$  ячейка возвращается в невозбужденное состояние. Параметры торосферы являются согласованными единицами и могут играть роль естественных масштабов измерения различных частиц и процессов, Они также определяют нижнюю границу применимости и действия законов современной физики. С помощью частоты оборотов  $v_{\text{п}}$  осуществляется переход от параметров одного оборота торосферы к единицам СИ.

Размерности энергии 1 Дж и единицы омического сопротивления  $\mathcal{E}$  позволяют определить переводные единицы размерности для всех физических величин: механических, электрических, магнитных и тепловых. Первичные размерности, которые вводятся для данного класса явлений безотносительно к другим величинам, выражаются через другие первичные размерности. Новые связи первичных единиц размерности открывают более широкие возможности для анализа различных явлений и физических процессов [2, с. 16].

Величина и размерность константы гравитации определяется в виде соотношения параметров торосферы  $G = v_{\text{п}}^2 \lambda_0^3 / m_{\text{п}}$ . Делением на коэффициент перевода  $\mathcal{E}$  константа гравитации переводится в величину и размерность удельного электрического сопротивления, которая может вычисляться по формуле  $G_3 = 1 / \epsilon_0 v_{\text{п}} = 1,526270299 \cdot 10^{-32}$  Ом·м. Умножением константы  $G_3$  на коэффициент  $\mathcal{E}$  определяется константа гравитации в размерности Ньютона  $G = 6,674332696 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/кг с<sup>2</sup>.

Если в некоторый локальный объем вакуума в течение короткого времени поступает энергия в размере  $\epsilon = n \epsilon_{\text{мин}}$ , то возбуждаются  $n$  ячеек. Возбуждение ячеек в пространстве распространяется целиком по одной бесконечной цилиндрической спирали с одинаковой длиной окружности и шагом  $\lambda = |c| / n$ . Такое возбуждение также целиком поглощается, что воспринимается как частица. Чем больше энергия возбуждения, тем большая частота циклотронных оборотов ( $n = |v|$ ) и меньше длина окружности и шаг спирали.

От локального воздействия энергией  $\epsilon_{\text{мин}} \leq \epsilon < \epsilon_c$  ( $\epsilon_c$  – энергетический эквивалент электрона) в вакууме появляются стабильные, нейтральные частицы – фотоны, которые существуют только в движении и переносят только энергию. Один циклотронный оборот спиральной траектории полностью определяет все свойства фотона и принимается за его модель. Возбужденные ячейки по длине окружности располагаются равномерно, при этом циклотронный оборот может деформироваться, проходить через узкие щели и сам может быть проникаем.

Модель фотона состоит из  $n$  одинаковых возбужденных ячеек с массой равной  $m_{\text{мин}}$ .

Величина  $m = n m_{\text{мин}}$  принимается за массу фотона, характеризующую его инертные и гравитационные свойства. Движение фотона, как в привычном смысле слова движение некоторой массы не существует, а существует лишь возбуждение циклотронного оборота ячеек с постоянной скоростью света по траектории бесконечной цилиндрической спирали.

Циклотронный оборот возбуждения характеризуется тремя ортогональными векторами (радиальным  $E$ , тангенциальным  $H$  и осевым  $K$ ), составляющими вектор импульса давления  $p = \epsilon / c$ . Круговым вращением напряженностей  $E$  и  $H$  осуществляется возбуждение пространства: правовинтовое вращение принимается за отрицательное направление тока и поляризации, а левовинтовое – за положительное направление тока и поляризации [2, с. 18].

Потоки фотонов в пространстве могут встречаться в разных направлениях. При этом никогда не может быть ячейки с удвоенным возбуждением, возле нее может быть только усиление или ослабление интенсивности поляризации. Фотоны не содержат электрических зарядов и имеют подобную форму. В расчетах принимается вычислять объем фотонов математической формулой кругового тора, с одинаковым отношением параметров ( $R / r$ ) как у торосферы

$$v = \zeta \cdot \lambda^3 \quad (10)$$

$\zeta = 1,827359237 \cdot 10^{-2}$  – постоянный объемный коэффициент.

Упругие свойства и состояния фотона, также как у электромагнитного поля, определяются адиабатным уравнением

$$v T^3 = \text{const} \quad (11)$$

С помощью второй радиационной постоянной  $C_2 = \lambda T$  адиабатный закон преобразуется в закон постоянства полной массы фотона (сумма кинетической и потенциальной масс), которая равна массе торосферы  $v T^3 = m_{\text{п}} = 5,455498497 \cdot 10^{-8}$  [м<sup>3</sup> К<sup>3</sup> = кг]. Полная масса  $m_{\text{п}}$  умноженная на квадрат скорости света выражает закон постоянства полной энергии фотонов  $\epsilon_{\text{п}} = m_{\text{п}} c^2$ .

При термодинамическом равновесии, адиабатное уравнение фотона в зависимости от параметров температуры и давления имеет вид

$$3 P = a T^4 \quad (12)$$

$P = \epsilon / v$  – внутреннее давление фотона, представляет собой эквивалент удельной объемной энергии;  $a = 7,585980937 \cdot 10^{-16}$  – макроскопическая постоянная энергии излучения Стефана – Больцмана, которая с учетом размерности массы (м<sup>3</sup>·К<sup>3</sup> = кг) преобразуется в размерность удельной массовой теплоемкости [Дж / м<sup>3</sup> К<sup>4</sup> = Дж / кг·К]. Точное значение постоянной Стефана – Больцмана

определяется в виде отношения параметров торосферы

$$a = 3k / m_{\pi} = 3 c^2 / T_{\pi} \quad (13)$$

Из закона постоянства полной энергии фотонов вытекает, что одна из частей энергии (кинетическая или потенциальная), может однозначно определять все его индивидуальные параметры. Любые процессы адиабатного изменения состояния фотона представляют собой только различные формы преобразования его собственной кинетической энергии в потенциальную, либо потенциальной энергии в кинетическую.

Неподвижный бесструктурный эфир в элементарной ячейке занимает  $(1 - \zeta) \approx 98,17\%$  всего объема, никакими силовыми процессами себя не проявляет, служит проводником для переноса малых энергий  $\leq \varepsilon_{\min}$  и является темной материей Вселенной. Все свойства ячейки, в том числе и плотность пространства вакуума, определяются массой торосферы  $\rho_{\pi} = m_{\pi} / \zeta \cdot \lambda_{\min}^3 = 8,20411581 \cdot 10^{95}$  кг / м<sup>3</sup>, которая принимается верхним пределом плотности любой существующей материи [3, с. 480].

Ограниченный набор констант ( $\varepsilon_0, \mu_0, e, h, m_{\pi}, \zeta$ ) является согласованной системой фундаментальных физических констант, который позволяет определить согласованную систему естественных единиц измерения и коэффициенты взаимного перевода размерностей. Константы из набора, взятые в различных соотношениях, выражают точные значения производных констант, определяют всю полноту и единство наших представлений о законах физического мира.

При локальных воздействиях энергией  $\varepsilon_e \leq \varepsilon < \varepsilon_{\pi}$  в пространстве рождаются стабильные и нестабильные заряженные частицы с замкнутым кольцом возбуждения и дополнительными свойствами. В природе известны только две стабильные заряженные частицы: отрицательный электрон и положительный протон, у которых имеются свои античастицы. Замкнутое кольцо из возбужденных ячеек представляют собой сумму элементарных токов с общим элементарным электрическим зарядом  $e$  [2, с.19].

Суммарный кольцевой ток  $I = n I_{\min}$  имеет суммарное магнитное поле. Заряженные частицы существуют в свободном и в связанном состоянии, обладая энергией и зарядом, являются основными структурными единицами в составе ядер, атомов и всех вещественных частиц. Они также имеют массу покоя и обладают изменяемой поступательной скоростью в интервале  $0 \leq w \leq c$ .

Электрон и протон генерируют в пространстве более плотные чем у фотонов потоки возмущения, представляемые радиальным вектором электрической напряженности  $E$ , тангенциальным вектором плотности магнитного потока  $H$  и вектором  $K$  направленного распространения частицы. Бесконечные линии электрической напряженности  $E$  между собой

разомкнуты, они начинаются на положительных и оканчиваются на отрицательных зарядах. Электрическая напряженность характеризуется избирательным действием: одноименные заряды отталкиваются, а разноименные заряды притягиваются.

Модель свободного покоящегося электрона представляет собой круговой тор с правовинтовым возбуждением ячеек и вращением торосфер, несущих отрицательную полярность. Модель характеризуется комптоновской длиной кольца  $\lambda_e = 2,426310235 \cdot 10^{-12}$  м, количеством возбужденных ячеек  $n_e = |v_e| = 1,235589976 \cdot 10^{20}$ , высотой тора равной диаметру круга  $2r_e = 370,095039 \cdot 10^{-15}$  м, электрическим эквивалентом энергии  $\varepsilon_e = n_e I_{\min} \Phi_{\min}$  и массой  $m_e = n_e m_{\min}$ . В модели суммарная линейная длина возбужденных ячеек  $n_e \cdot \lambda_{\min} = 5,005820383 \cdot 10^{-15}$  м составляет приблизительно 1/485 часть длины кольца.

Модель свободного покоящегося протона представляет собой круговой тор, с левовинтовым возбуждением ячеек и вращением торосфер, несущие положительную полярность. Модель характеризуется комптоновской длиной кольца  $\lambda_p = 1,321409845 \cdot 10^{-15}$  м, количеством возбужденных ячеек  $n_p = |v_p| = 2,268731833 \cdot 10^{23}$ , высотой тора равной диаметру круга  $2r_p = 0,2015601004 \cdot 10^{-15}$  м, электрическим эквивалентом энергии  $\varepsilon_p = n_p I_{\min} \Phi_{\min}$  и массой  $m_p = n_p m_{\min}$ . В модели суммарная линейная длина возбужденных ячеек  $n_p \cdot \lambda_{\min} = 9,191450461 \cdot 10^{-12}$  м представляет собой примерно 6,9 комптоновских длин кольца.

К параметрам свободных зарядов, если поступательная скорость  $w = 0$ , применимы названия „кинетическая энергия“, масса, температура, частота и объем покоя”. При поступательной скорости  $w \neq 0$  кинетические параметры покоя, пропорционально увеличиваются с помощью кинетического коэффициента преобразования  $\beta = (1 + w^2 / c^2)$ , а объем частиц подобно уменьшается в  $\beta^{-1}$  раз.

Поступательное движение заряда в вакуумном пространстве представляет собой электрический ток и добавочную изменяемую кинетическую энергию движения заряда  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_e \cdot (w^2 / c^2)$ . Параметры массы изменяются за счет соответственного числа возбужденных ячеек  $\Delta n = \Delta\varepsilon / \varepsilon_{\min}$  окружающего пространства. Таким образом равномерное движение заряженной частицы несет в себе четкий признак изменения своего состояния от неподвижного.

Торосфера, фотон, электрон и протон являются элементарными стабильными структурными частицами, их массовая плотность меньше плотности эфирного вакуума, поэтому они подвержены эфирному сжатию. Одинаковая природа и подобная форма позволяют определять основные индивидуальные параметры по общим формулам. Элементарные частицы подчиняются закону сохранения полной энергии, который лежит в основе всех кинетических законов.

Кинетическая энергия и масса покоящегося электрона в 1836 раз меньше, чем у протона, а его

радиус во столько же раз больше. Разные электрические заряды и свойства частиц приводят к тому, что при их сближении могут происходить различные стабильные соединения. В соединениях вращение противоположных электрических зарядов в одном направлении представляют собой кольцевые электрические токи с окружающим их магнитным полем отталкивания. Расстояние между зарядами устанавливается тогда, когда электрическое и гравитационное притяжение уравновешивается магнитным полем отталкивания.

Последовательным присоединением предшествующих частиц к вновь образованным организуется переход от простых к сложным структурам, с рассеиванием величины их энергии связи в окружающем пространстве. Субъядерные, ядерные, атомные и молекулярные соединения состоят из элементарных частиц одной природы, подчиняются законам сохранения массы и энергии в закрытых системах, чем обеспечивается единство планковского мира.

Модель пространства-эфира демонстрирует соответствие неразрывному единству существования и изменчивости материи. Известен атом водорода протий, соединение протона вне собственного кольца электрона. В природе также существуют соединения с расположением протонов внутри собственного кольца электрона: квазистабильный нейтрон, положительно заряженные ядра дейтрона и гелиона. Из-за большой разности масс электрона и протонов общая ось вращения в соединениях практически совпадает с общей осью протонов.

Компонентами стабильных ядер от  $\alpha$ -частицы до висмута являются субъядерные частицы с близкими диаметрами внешних орбит электрона: нейтрон, дейтрон и  $\alpha$ -частица (сильное соединение двух дейтронов). В строении ядер и изотопов наблюдается индивидуальность благодаря строгому взаимному расположению и числу субъядерных частиц: на торцах могут находиться только дейтроны и  $\alpha$ -частицы, не могут быть соседями два нейтрона и две  $\alpha$ -частицы (ядро распадается).

Цилиндрическая форма стабильных составных ядер формируется внешними плотно сомкнутыми кольцами электронов и их протонами, расположенными внутри с промежутками на общей оси. Гравитационное и электрическое притяжение в цилиндрическом ядре удерживает положительно заряженные субъядерные частицы от разлета, обеспечивая всестороннее сильное сжатие, которое исключает присутствие между ними фотонов. С ростом числа заряда ядра дефект массы увеличивается, но не превышает массы электрона даже для самых тяжелых атомов [4, с. 147].

Заряд, удельная энергия и длина цилиндрического ядра определяют структуру и

способ формирования электронной оболочки атомов. С учетом большого расстояния между ядром и атомными электронами силами гравитации можно пренебречь. Связь электронов оболочки в атомах по величине на несколько порядков меньше, чем энергия связи в ядрах. Невозбужденному состоянию атома соответствует минимальный внешний радиус орбиты атома и максимальная отрицательная энергия связи электрона с ядром, равная потенциалу его ионизации.

Процесс поглощения фотона (возбуждения и изменения температуры) сопровождается энергией перехода электрона на орбиту с большим радиусом и противоположным импульсом отдачи иона. Импульсы являются причиной давления, хаотического движения и равномерного распределения атомов по объему. В результате электростатического взаимодействия атомы могут объединяться в различные молекулы. Силы связи между атомами в молекуле более слабые, чем связи электронов в атомах, поэтому дефектом массы при образовании молекул можно пренебрегать без большой ошибки.

**Заключение:** Планковская модель пространства представляется неподвижными условными ячейками с уточненными параметрами. Ячейки состоят из неподвижного и подвижного эфира, отвечают за гравитацию и однородное изотропное распределение материи в пространстве. Возникновения квантовых электромагнитных сил и различных элементарных частиц происходит под действием внешней энергии на подвижный эфир в ячейках. Элементарные частицы и их взаимодействия присутствуют во всех известных частицах, подтверждая единство и причинность появления всех видов материи.

### Список литературы

1. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др.—М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 3. 1992. 672 с.
2. Масалович В.Г. Эфир и гравитация. /Сборник трудов по материалам XX Международного конкурса научно – исследовательских работ (20 января 2025 г., г. Уфа). /– Уфа: Изд. „НИЦ Вестник науки”, 2025. с. 112.
3. Физическая энциклопедия/ Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др.—М.: Сов. Энциклопедия. Т. II. 1990. 703 с.
4. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др.— М.: Сов. энциклопедия. Т. 1. 1988. 704 с.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### A NEW PROPOSAL FOR DIRECTION FINDING IN CASE OF PROPELLER-EQUIPPED MARINE TARGETS ABSTRACT

**Nguyen Thanh Chinh**

*Ph.D. in Engineering, Naval Technical Institute,  
Vietnam*

**Nguyen Khac Tung**

*Ph.D. in Engineering, Naval Technical Institute,  
Vietnam*

**Tran Van Duc**

*Master of Engineering, Naval Technical Institute,  
Vietnam*

**Nguyen Cong Chung**

*Engineer, Naval Technical Institute,  
Vietnam*

The low-frequency discrete spectral components generated by the shaftpropeller systems of marine targets play a crucial role in signal processing, particularly in the problem of underwater acoustic direction finding. Preprocessing step to select these spectral components helps enhance the signal-to-noise ratio (SNR) of the signal input to direction of arrival (DOA) algorithms. This paper proposes a novel solution to improve the selectivity and accumulation of lowfrequency line spectral components, which are key features in the detection and parameter estimation of underwater targets. The proposed method combines several classical signal processing techniques, including Low-Frequency Analysis and Recording (LOFAR), Detection of Envelope Modulation on Noise (DEMON), and adaptive comb filtering. This combination enhances the input signal's SNR, providing improved quality for subsequent processing stages, especially DOA estimation. Simulation results demonstrate a significant improvement in the performance and accuracy of the DOA algorithm, suggesting a new approach for detecting and characterizing this type of underwater target.

**Keywords:** underwater, passive sonar, DOA, marine target, propeller.

#### Introduction

Passive DOA is a complex problem in the field of signal processing. Solving this problem not only requires the implementation of sophisticated algorithms but also necessitates additional evaluations of noise models, useful signal models, and the impact of environmental acoustic propagation parameters [8, 14]. In recent years, numerous studies have been published in this field [3, 4, 6]. Accordingly, the foundations for constructing the spatial spectrum functions for DOA estimation have been investigated from various perspectives, including subspace decomposition, spatal-time-frequency distribution [11], and sparse representations [7]. In addition, AI-based solutions for the DOA problem have also been proposed [9, 10].

Preprocessing of underwater acoustic signals to enhance the SNR for DOA estimation is a widely used concept. Techniques such as LOFAR, DEMON, or a combination of both have been proposed and applied for a long time [5]. These techniques aim to isolate and select low-frequency bands containing the line spectra characteristic of marine propeller systems, thereby enhancing target selection efficiency in signal processing systems. However, such signals are still

#### Problem

#### Data model

Assume that the passive sonar system uses a uniform linear antenna array consisting of: number of hydrophones:  $M$ ; spacing between hydrophones:  $d$  (ensuring that the distance is less than half the wavelength); reference element: the first hydrophone.

significantly affected by noise, caused by mechanical inconsistencies of the propeller structure and operational disturbances. Nevertheless, the cyclic nature of signals from propeller-driven targets remains a stable and distinguishing feature of this type of source. Based on this property, comb filters can be applied to selectively extract useful signals, leading to significant performance improvements for LOFAR and DEMON. In [12], the authors proposed a solution that combines LOFAR, DEMON, and a comb filter to detect shaft rotation frequencies in signal processing. However, this study was limited to deep learning networks using sample datasets, and the comb filter parameters as well as their formulation and application mechanisms were not thoroughly analyzed, lacking discussion on adaptability in real-world processing scenarios.

Building upon these analyses, this paper proposes a novel approach that combines the selection of discrete spectral features specific to propeller-driven marine targets with DOA . Furthermore, the use of adaptive recursive comb filters in passive sonar systems is, for the first time, introduced as a solution in this line of research.

It is assumed that there are  $Q$  propeller-equipped targets ( $Q$  signal sources). The  $q$ -th target has a frequency band  $f_{q\_min} \leq f_{q\_max}$  and is located at direction angle  $\theta_q$  ( $q=1, \dots, Q$ ). A schematic diagram illustrating the maritime scenario with the deployed sonar system and targets is shown in Figure 1. Where,  $s_1, s_2, \dots, s_Q$  are the signal sources (targets); Hyd 1, Hyd 2, ..., Hyd M are the hydrophones from 1 to M in the antenna array. The scenario is shown in Figure 1.

The discrete spectral components of the target noise signal are harmonics of the shaft rotation frequency ( $f_s$ ) and the blade rotation frequency ( $f_b$ ). If the propeller has  $N_b$  blades, then:

$$f_b = N_b \cdot f_s \tag{1}$$

These tone components and its harmonics can generally be represented as:

$$f_l = l \cdot f_s \tag{2}$$

Where,  $l=1, L$  with  $L$  being the total number of discrete spectral lines generated by the shaft and blades.

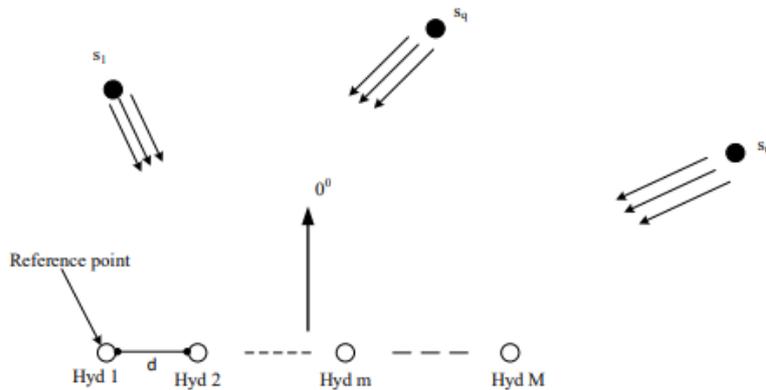


Figure 1. Passive sonar system and targets

The time-domain mathematical model of the target signal, without loss of generality, is assumed to be  $q$ -th target, and is given by the form [9]:

$$s_q(t) = s_{qT}(t) + s_{qC}(t) + n(t) \\ = s_{qT}(t) + \left( 1 + \sum_{l=1}^L A_l \cos(2\pi l f_s t) \right) c(t) + n(t). \tag{3}$$

Where,  $s_{qT}$  is the signal component containing discrete spectral lines;  $s_{qC}(t)$  is the signal component containing continuous spectrum. This component results from continuous noise modulated by  $c(t)$ , the propeller rotation process (due to cavitation, hydrodynamic noise caused by interaction with water, or both);  $A_l$  is the amplitude of  $l$ -th spectral component;  $n(t)$  is background noise.

Depending on the specific structure and design of each type of vessel, the general spectral noise form emitted by the vessel will exhibit distinct characteristics. However, some common features still exist, as follows:

- In the infrasonic range, the discrete spectrum typically shows intensity levels higher than the average, ranging from 10 dB to 25 dB, depending on the vessel type and specific operating conditions.
- For the continuous spectrum, at low frequencies, the spectral intensity usually increases at a rate of approximately +6 dB per octave, while at high frequencies, it decreases at the same rate of -6 dB per octave.

Therefore, before performing signal processing, a band-pass FIR filter with a frequency response slope of +6 dB per octave is commonly applied to prequalize the input signal.

The signal observed at each hydrophone can be expressed as:

$$y(t) = A(\theta) \cdot s(t) + n(t). \tag{4}$$

Or, in matrix form:

$$Y = A \cdot S + \zeta. \tag{5}$$

Where,  $\mathbf{Y}=[y_{t_0}(), y_{t_1}(), \dots, y_{M-1}()]t^T$  is the received signal matrix that accounts for the effect of additive noise, with dimensions  $M \times N$ , where  $N$  is the number of data samples;  $\zeta=[\zeta_{t_0}(), \zeta_{t_1}(), \dots, \zeta_{M-1}()]t^T$  is the additive noise affecting the hydrophones;  $\mathbf{A}=[a_1, a_2, \dots, a_Q]$  is steering matrix with  $a_i$  is steering vector corresponded to  $s_q$  target, and  $[\cdot]^T$  is the transpose operator.

Under the assumptions of narrowband conditions, far-field propagation, and a point source, with the signal's center angular frequency being  $\omega_c$ , then:

$$a(\theta_i) = [1, e^{-j\omega_c \tau_i}, \dots, e^{-jm\omega_c \tau_i}, \dots, e^{-j(M-1)\omega_c \tau_i}]^T = [1, e^{-j\phi}, \dots, e^{-jm\phi}, \dots, e^{-j(M-1)\phi}]^T \tag{6}$$

where  $m\tau_i$  is the time delay at the  $m$ -th sensor element from source  $i$ , and the deviation in the time delay,  $\Delta\tau_i$ , is transferred to phase deviation  $\Delta\phi_i = \omega_c \Delta\tau_i = c_i \Delta d \sin(\theta) / c$ .

Solution

2.2.1. Discrete spectral line characteristic of marine propeller targets selection based on combined techniques LOFAR, DEMON and AD-COMB

In typical situations, the received signal  $s(t)$  may consist solely of background noise  $n(t)$ , or background noise combined with one of the other two components, or include all three components. When the components  $s_T(t)$  dominate, the LOFAR algorithm is effective, whereas when  $s_C(t)$  dominates, the

DEMON algorithm is more commonly used. However, in most cases, when there is no prior information about the dominant region in the noise spectrum, a combination of LOFAR and DEMON provides stability and efficiency for signal processing. The functional block diagram of the combined LOFAR and DEMON algorithm (LDC) is shown in the figure 2.

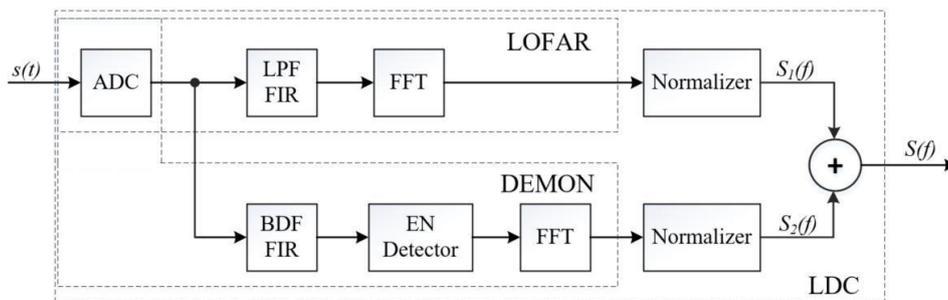


Figure 2. Functional block diagram of the LDC algorithm

This diagram includes the use of abbreviations as below. ADC: Analog to Digital Converter; LPF FIR: Lowpass Filter – Finite Impulse Response; BDF FIR: Bandpass Filter – Finite Impulse Response; FFT: Fast Fourier Transform; LDC: LOFAR - DEMON Composition.

2.2.2 Adaptive recursive comb filter in propeller noise signal processing

A comb filter has a frequency response characterized by a series of equally spaced notches alternating with equally spaced peaks, creating a shape resembling a comb, hence the name comb filter. In signal processing, a comb filter (COMB) is used to filter signals with periodic characteristics, either to retain or suppress those periodic components.

In passive sonar, when receiving noise signals from marine targets with propellers, the COMB filter can also be applied based on a similar principle to periodic cancellation used in active systems. In this case, the delay period is set equal to the rotation period of the detected target's propeller shaft,  $T_r = 1/f_s$ . The structural diagram, selection analysis of the filter type, and related coefficients of the COMB filter are presented below [13]. The chosen filter model is the recursive comb filter (R-COMB) with the structural diagram shown in Figure 3.

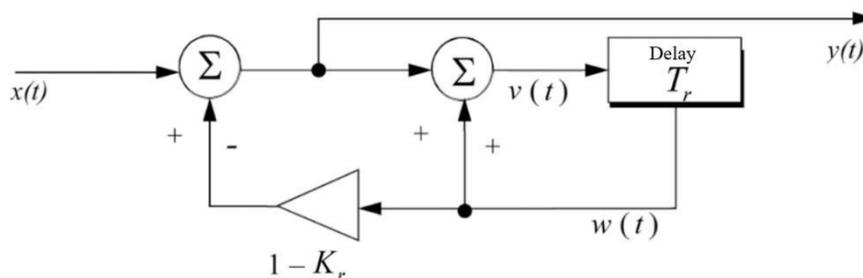


Figure 3. The time domain structural diagram of R-COMB

In this structure, instead of summing the input signal with its delayed version, a recursive process is proposed as a replacement to improve the filter's efficiency. Accordingly, the difference equation system of the R-COMB is:

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) - (1 - K_r)w(t), \\ v(t) &= y(t) + w(t), \\ w(t) &= v(t - T_r), \end{aligned} \tag{7}$$

where,  $K_r$  is feedback ratio of R-COMB.

Apply the z-transform to the system of equations (7) and compute the transfer function  $H(z) = Y(z) / X(z)$ , then:

$$H(z) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - K_r z^{-1}}. \tag{8}$$

The squared magnitude of the transfer function  $H(z)$  and note that  $z = e^{j\omega T_r}$ , will yield the squared amplitude–frequency response of the RCOMB filter:

$$|H(e^{j\omega T_r})|^2 = \frac{2(1 - \cos(\omega T_r))}{(1 + K_r^2) - 2K_r \cos(\omega T_r)}. \tag{9}$$

Thus, in order to apply the R-COMB filter in passive sonar, it is essential to have information about the shaft frequency  $f_s$ . This shaft frequency is detected based on the accumulated spectrum of the signal after LDC processing. The module that performs this function is called FBS&SNE. The combination of R-COMB and FBS&SNE results in an adaptive recursive comb filter, referred to as AR-COMB

2.2.3. A super-resolution DOA estimation algorithm applied to signals with selected characteristic discrete spectral components

The combination of LDC, FBS&SNE, and AR-COMB forms an adaptive preprocessing method for selecting characteristic discrete spectra (Frequency Bins Selection – BS) of marine propeller targets in passive sonar signal processing in general, and in the passive DOA estimation problem in particular. The functional block diagram of the BS solution is shown in Figure 4.

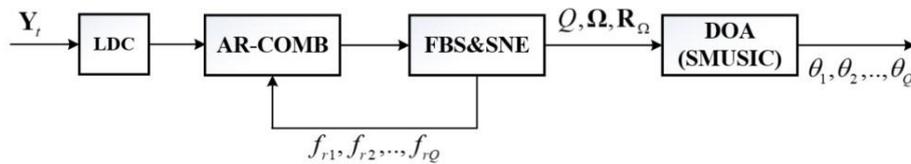


Figure 4. BS solution

Accordingly, the signal received at the output of the antenna array  $Y_t$  is digitized by ADC modules to obtain the digital signal  $Y_n$ . Next, the digital signal  $Y_n$  is passed through the LDC component to select the low-frequency region containing the characteristic discrete spectrum. The output of LDC is the frequencydomain signal  $Y_f$ . This signal  $Y_f$  is then passed through the AR-COMB filter to retain only the frequency components that are harmonics of the shaft and blade rotation frequencies ( $f_s, f_b$ ) of the propeller. Simultaneously, the FBS&SNE algorithm estimates the number of targets  $Q$  and selects a set of useful frequencies, along with the corresponding covariance matrix  $\Omega$  of the selected spectral bins. In addition, the estimated shaft frequencies of the targets  $f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_{sQ}$  are fed back to the AR-COMB filter to adaptively tune the comb resonance frequencies.

Results and discussion

Input data

The antenna array data is semi-simulated, generated by using a single acoustic sample and artificially assigning a simulated DOA. This acoustic sample is selected in one of two ways: either through simulation or by choosing audio samples from a database ASMD [1, 2].

The signal generation model for the ULA receiving array is based on the assumption that the target emits a sound signal  $s(t)$  from direction  $\theta$ . Under this assumption, the received signal of the array is formulated as follows:

$$y_m(t) = s(t - (m - 1)\tau), \tag{10}$$

Where  $y_m(t)$  is the signal received at the  $m$ -th antenna element, and  $d = d \sin \theta / c$ , with  $c$  being the speed of sound in water and  $d$  the spacing between array elements.

#### Simulation results and comments

The audio samples exhibit a wide spectral distribution, primarily concentrated in the frequency range of 1,000 Hz to 80,000 Hz. When applying direct signal analysis tools, it is not possible to detect or isolate the discrete spectral components characteristic of propeller noise. By employing the BS technique in the preprocessing stage, the propeller shaft frequency and its harmonics are successfully identified, clearly revealing the signature features of such targets. The BS processing results for file #07 from the ASMD dataset, analyzed in the frequency domain, are presented in Figure 5; the corresponding time-frequency domain analysis is shown in Figure 6.

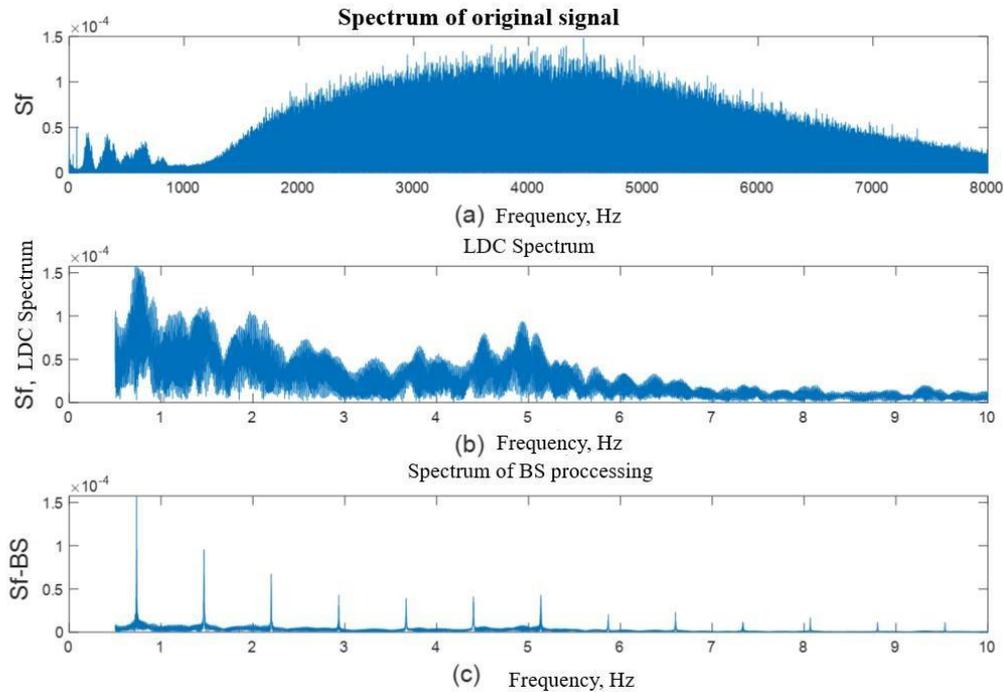


Figure 5. Frequency-domain processing

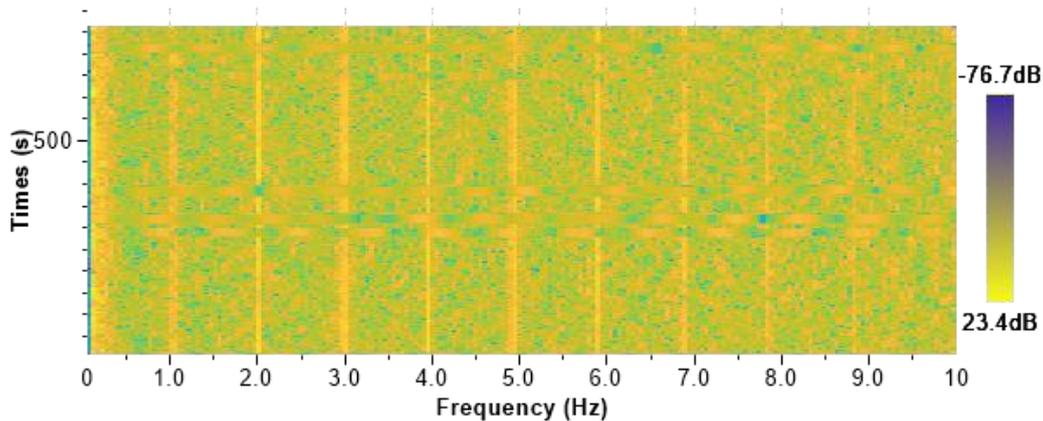


Figure 6. Time-frequency based signal processing

Accordingly, the input signal has its energy concentrated in the frequency band 1000–8000 Hz and exhibits two spectral lines in the low-frequency region at 33 Hz and 66 Hz in Figure 5(a), which correspond to the fundamental and subharmonic components generated by the power generators. When applying the BS technique to this signal, the LDFS result in Figure 5(b) and the final outcome in Figure 5(c) successfully separate the shaft frequency  $f_r = 0,73$  Hz and its harmonic components.

#### Performance of the new proposed solution

In the case where the original audio file is a field-recorded signal, simulations are conducted using files from the AMSB database [2]. For illustration purposes, the files are sampled at a frequency of 48 kHz; file #6 is used to simulate a target located at a  $-10^\circ$  bearing angle, with a duration of 6 minutes and 43 seconds, while file #1 simulates a target at a  $+20^\circ$  bearing angle, with a duration of 13 minutes and 10 seconds. The files are

synchronously segmented into  $P= 512$  sections, each with a length of  $N =1024$  samples (corresponding to approximately 32.8 seconds of processed audio per segment).

The results of applying the Multiple Signal Classification (MUSIC), Smooth MUSIC (SMUSIC) algorithms, and the BS-MUSIC, BS-SMUSIC methods to these signal sources are presented in Table 1 and Figure 7.

Table 1.

Calculation results of the algorithms for two uncorrelated semisimulated sources.

Algorithm \ Source		Source 1 (-10°)	Source 2 (+20°)
MUSIC-DOA	Angle (°)	-9,9°	+19,9°
	PBGL (dB)	1,9	4,8
BS-MUSIC	Angle (°)	-9,9°	+19,7°
	PBGL (dB)	17,0	14,0
BS-SMUSIC	Angle (°)	-9,9°	+19,7°
	PBGL (dB)	22,1	17,0

Accordingly, for semi-simulated signals, the evaluation results still indicate that the BS-SMUSIC algorithm provides the best performance, achieving a Peak-to-background level (PBGL) of 22 dB, that 5 dB higher than that of BS-MUSIC and 20 dB higher than the original MUSIC algorithm for the first source. For the second source, BS-SMUSIC achieves 17 dB, which significantly outperforms the 14 dB achieved by BS-MUSIC and the 4.8 dB of the MUSIC algorithm.

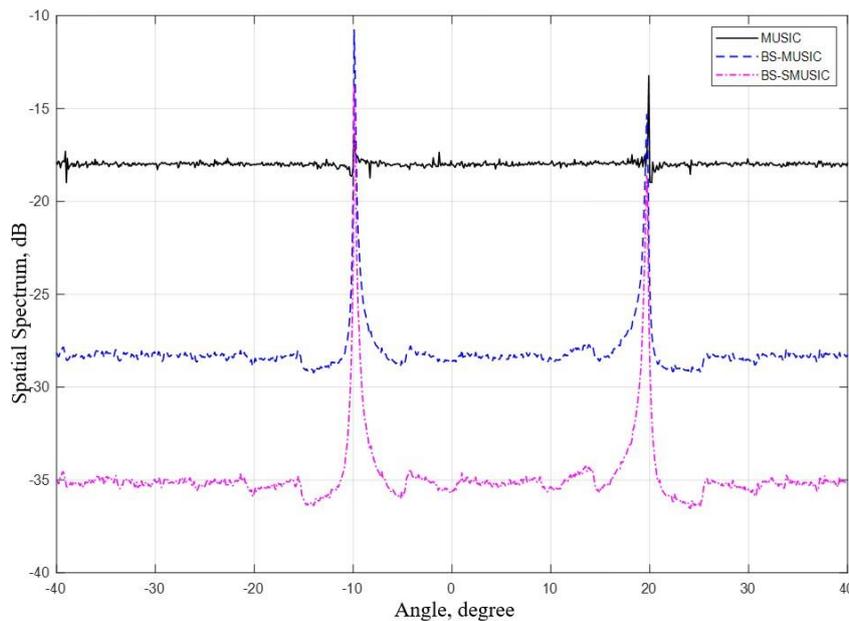


Figure 7. Direction-of-arrival estimation results for two uncorrelated semisimulated acoustic signal sources

Accuracy assessment of the proposed solution

The RMSE evaluation was also conducted based on the Monte Carlo method with 200 random trials. The simulated source parameters, as described item 4.2, were combined with correlated source conditions. The results are shown in Figure 8.

Accordingly, the four direction-of-arrival estimation algorithms evaluated were BS-SMUSIC, BS-MMUSIC (Modified MUSIC), SMUSIC, and MMUSIC. The  $SNR=-5 \square 20$  dB was used to assess the RMSE of these algorithms. The results show that, when combined with the BS technique, the error remains stable and increases slightly within an acceptable range, even at high SNR levels. In contrast, when not combined with the BS technique, the error spikes significantly as noise increases.

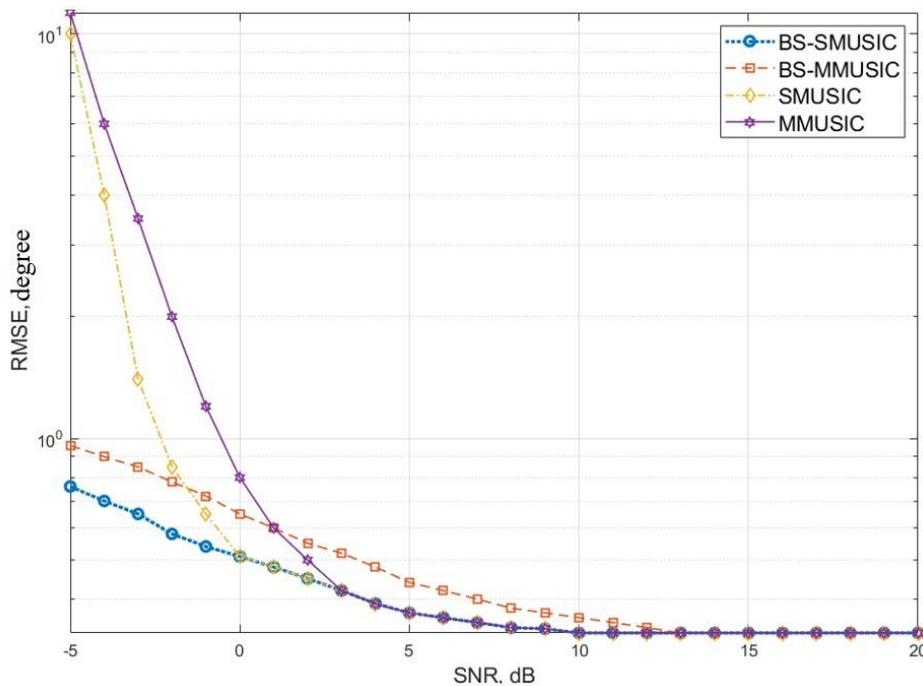


Figure 8. RMSE of the BS-SMUSIC algorithm and others

In the range 13–20 dB, all four algorithms exhibit the same error level with an RMSE of  $0.3^\circ$ . In the range  $-5$ –13 dB, the RMSE of BS-MMUSIC increases steadily to nearly  $1^\circ$ . Meanwhile, the BS-SMUSIC algorithm shows a similar increasing trend within the same range but consistently yields a lower error, reaching approximately  $0.8^\circ$  at  $-5$  dB. In contrast, the original algorithms without BS integration show a sharp rise in error when  $SNR \leq 0$  dB, reaching  $10^\circ$  and  $11^\circ$  at  $SNR = -5$  dB for SMUSIC and MMUSIC, respectively.

#### Conclusions

Thus, the proposed solution demonstrates higher performance and accuracy compared to conventional direction-finding algorithms based on the same principles. The selective extraction of the characteristic discrete spectrum of propeller-driven marine targets enhances the SNR. As a result, it increases the PGBL and improves the accuracy of the applied direction-finding algorithms. The simulation computations were developed using a semi-synthetic array data generation method based on real acoustic samples, ensuring the accuracy and reliability of the proposed solution and offering a new development direction for passive sonar systems.

#### REFERENCES

- [1]. Naval Engineering Institute, Research on the Impact of Marine Environmental Factors on the Operating Range of Underwater Acoustic Devices, National level Project, Code No. KC.09/11-15, 2015.
- [2]. Naval Engineering Institute, Research on the Design and Development of an Underwater Unmanned Vehicle for Training, Ministry of National Defense level Project, Code No. KC.NQ-09, 2021.
- [3]. Chen, Z., G. Gokeda, and Y. Yu, Introduction to Direction-of-arrival Estimation. 2010: Artech House.
- [4]. Xu, X., X. Wei, and Z. Ye, DOA estimation based on sparse signal recovery utilizing weighted  $\ell_1$ -norm penalty. IEEE signal processing letters, 2012. 19(3): p. 155-158.
- [5]. J. Urlick, R., Principles of Underwater Sound 3rd Edition 2013: Peninsula Publishing.
- [6]. Ali Khan, N.A., Sadiq, Jansson, Magnus Direction of arrival estimation using adaptive directional time-frequency distributions. Signal Processing, 2018. Multidimensional Systems, 29(2): p. 503-521.
- [7]. Yang, Z., et al., Sparse methods for direction-of-arrival estimation, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7. 2018, Elsevier. p. 509-581.
- [8]. Abraham, D.A., Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation. 2019: Springer.
- [9]. Doan, V.-S., et al. Convolutional neural network-based DOA estimation using non-uniform linear array for multipath channels. in Industrial Networks and Intelligent Systems: 6th EAI International Conference, INISCOM 2020, Hanoi, Vietnam, August 27–28, 2020, Proceedings. 2020. Springer.
- [10]. Doan, V.-S., et al., MoDANet: Multi-task deep network for joint automatic modulation classification and direction of arrival estimation. IEEE Communications Letters, 2021. 26(2): p. 335-339.
- [11]. Eranti, P.K. and B.D. Barkana, An overview of direction-of-arrival estimation methods using adaptive directional time-frequency distributions. Electronics, 2022. 11(9): p. 1321.
- [12]. Li, L., S. Song, and X. Feng, Combined lofar and demon spectrums for simultaneous underwater

acoustic object counting and f 0 estimation. *Journal of Marine Science Engineering*, 2022. 10(10): p. 1565.

[13]. Mahafza, B.R., *Radar systems analysis and design using MATLAB*. 4th ed. 2022: Chapman and Hall/CRC.

[14]. Болгов, В.М., *Акустические шумы и помехи на судах*, ed. В. М. Болгов and В.Е.Я.Л. Д. Д. Плахов. 1984: Судостроение. 192.

UDC 699.841

---

## STRUCTURAL SOLUTIONS FOR ENSURING SEISMIC RESILIENCE OF COMMERCIAL AND RESIDENTIAL BUILDINGS IN HIGHLY SEISMICALLY ACTIVE REGIONS OF THE U.S.

---

*Yarov Y.*

*Kyrgyz National University named after Zhusup Balasagyn,  
Bishkek, Kyrgyzstan*

### КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ И ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В США

*Ю. Яров*

*Кыргызский Национальный Университет им Жусупа Баласагына,  
Бишкек, Кыргызстан*

This article explores structural solutions for ensuring the seismic resilience of commercial and residential buildings in highly seismically active regions of the U.S. It examines the impact of seismic waves on building structures and analyzes the basic principles of earthquake resistance, including the balance between rigidity and flexibility of buildings and the use of modern seismic protection technologies such as seismic isolators, dampers and shock absorbers. The article reviews the specific design features of apartment buildings, private houses, and small structures, along with seismic protection technologies tailored to different building types. It also evaluates the primary technologies and approaches that ensure the safety and durability of buildings in seismically active zones.

В статье рассматриваются конструктивные решения для обеспечения сейсмоустойчивости коммерческих и жилых зданий в условиях высокой сейсмической активности в США. Исследуется влияние сейсмических волн на строительные конструкции и анализируются основные принципы сейсмостойкости, включая баланс между жесткостью и гибкостью зданий, а также использование современных сейсмозащитных технологий, таких как сейсмические изоляторы, демпферы и амортизаторы. Рассматриваются особенности проектирования многоквартирных домов, частных домов и малых строений, а также их сейсмозащитные технологии, соответствующие типам зданий. Анализируются основные технологии и подходы, обеспечивающие безопасность и долговечность зданий в сейсмоактивных зонах.

**Keywords:** seismic resilience, earthquakes, structural solutions, seismic protection technologies, seismic isolators, dampers, shock absorbers.

**Ключевые слова:** сейсмоустойчивость, землетрясения, конструктивные решения, сейсмозащитные технологии, сейсмические изоляторы, демпферы, амортизаторы.

#### Introduction

Resistance to earthquakes is one of the big tasks of today's construction and architecture, especially when it concerns countries with increased seismic activities. Over time, the demands that have been issued for building structures that can cope with seismic wave effects have not only expanded but also become quite technologically sophisticated. In the context of the growing urban process, extension, and agglomeration of residential and commercial buildings, the question of earthquake resistance becomes more relevant. Buildings that do not conform to modern standards may cause serious danger to people and property during earthquakes.

Special attention to the issue of seismic resistance in the U.S. is due to the fact that it is located in various seismic zones, where destructive earthquakes may occur both in large megacities and in less densely

populated areas. Along with natural threats, the social and economic consequences of destruction are becoming a serious problem for local authorities and property owners.

Seismic stability can be provided by integrating various methods and solutions into the whole design process, starting from selecting building materials to applying innovative systems for shock absorption of seismic waves. The aim of this study to explore structural solutions that enhance the seismic resilience of commercial and residential buildings in regions with high seismic activity.

Main part. Theoretical foundations of building seismic resilience

Seismic waves are types of mechanical waves that arise from the motion of the Earth, usually produced by tectonic events such as earthquakes. This is not the same across different parts of the U.S. because the

country lies on the border of several tectonic plates, creating different parts of it to have various amounts of seismic risk. Some regions are prone to repeated and strong earthquakes, especially on the west coast. In California, as a result of the San Andreas fault, earthquakes are not uncommon, like the San Francisco earthquake in 1906 and the Northridge earthquake in 1994. Alaska is part of the most seismically active areas; in it, there was a great earthquake with 9,2 magnitude in 1964. In the northwestern states, strong earthquakes also occur as a result of subduction of the

oceanic plate. In the other parts of the country, earthquakes are less frequent; however, they may also be very destructive, such as those that happened in New Madrid in 1811-1812 [1].

Over the past decade, a total of 1760 earthquakes with a magnitude of 4,0 or greater have occurred within a 186-mile radius of the U.S. On average, an earthquake occurs approximately every two days, or 176 earthquakes per year, highlighting the importance of seismic-resistant design (fig. 1).

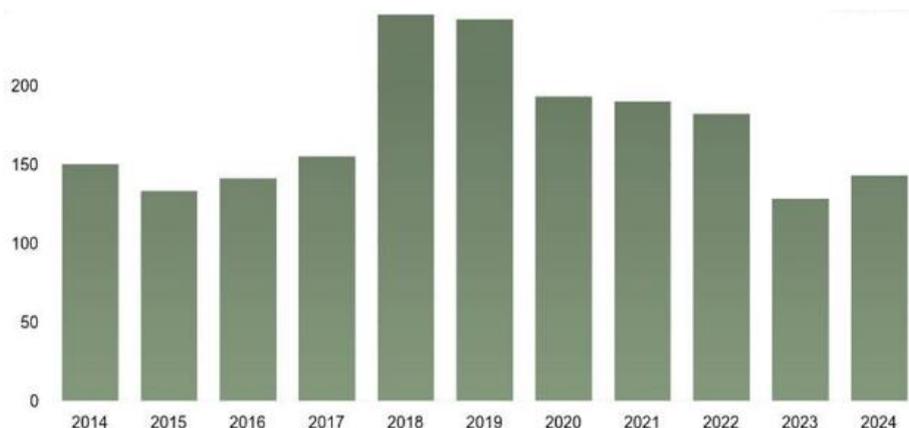


Figure 1. Annual earthquakes with magnitudes of 4,0 and above within 186 miles of the U.S., 2024 [2]

Seismic waves produced by tectonic processes travel through the Earth and can cause destructive vibrations in building structures. Their action upon buildings depends on their type and characteristics, as well as on the characteristics of the material and construction of the structure itself. **P-waves** transmitted at high speed affect buildings with relatively little force, while **S-waves** and surface waves, propagating more slowly, have a greater destructive ability, causing strong vibrations, especially in the upper floors of buildings. The most dangerous for structures are **precisely surface waves**, which can cause significant damage if they affect weak soils and buildings with insufficient seismic resistance.

The general seismic resistance requirements of buildings aim at the restriction of earthquake effects. The building has to be designed to resist earthquake-induced stresses for stability and usability. One of the main considerations is striking a balance between structure flexibility and stiffness. Too rigid buildings can experience great stresses and deformations that lead to destruction, **while too flexible structures can be subjected to excessive fluctuations**. For effective resistance to seismic forces, buildings must be designed taking into consideration the **possibility of vibration damping** that reduces the amplitude of deformations and prevents the destruction of structural elements. **Seismic insulators, dampers, and shock absorbers** are some of the devices being used to effectively absorb energy transmitted by seismic waves, minimizing earthquake damage.

Thus, the importance of the design of earthquake-resistant buildings arises with the aim of minimizing damage and ensuring safety. The use of modern seismic

protection technologies in construction and following the principles of seismic resistance are of great importance for the creation of stable structures that can resist seismic waves.

Structural solutions for residential buildings

Where seismic activities are high, there is no possibility of constructing and designing earthquake-resistant homes without the use of advanced materials and technologies. The deployment of earthquake-resistant materials like reinforced concrete, steel, and composite materials play a crucial role in offering safety for housing structures. High compressive strength characterizes **reinforced concrete** and allows for the efficient load distribution of earthquake loads. The addition of **steel**, due to tensile strength, in addition to ductility, provides extra structural flexibility to the building to sustain all forms of deformations. **Composite material** use in carbon and fiberglass-reinforced panels is increasingly becoming popular because they are light in weight and can resist high seismic loads. In addition, these helps reduce the overall weight of the structure effectively.

Technologies for strengthening homes in earthquake-prone areas involve both supports from the outside and changes to the structural framework of the building. One method to address this is by **reinforcing foundations with deep injection soil stabilization or by implementing pile systems**, which improves resistance to lateral seismic forces [3]. Another involves reinforcing the **frame structure with steel and reinforced concrete elements**, significantly increasing the building's capacity to withstand destructive oscillations. These technologies require precise calculations and consideration of soil and climatic

conditions.

The **introduction of seismic dampers and shock absorbers** in home buildings is now a typical characteristic of contemporary earthquake-resistant constructions. These devices, mounted at different locations of the building, successfully seize seismic energy and minimize oscillation amplitudes. Seismic dampers, hydraulic or pendulum-type, are combined with vibration-damping shock absorbers. The application of these technologies minimizes

deformation, safeguarding against structural damage and collapse hazard. In building residences, where safety and comfort are the most important issues, such solutions are particularly valuable as they both add safety and reduce perceived vibrations, contributing to a more pleasant living space. The design of apartment buildings, single-family homes, and small buildings to be constructed in seismically active zones requires a particular approach for each building type (table 1).

Table 1.

**Design features and seismic protection technologies for different building types [4, 5]**

Type of building	Design features	Seismic protection technologies
Apartment buildings	The stability of the frame structure, the distribution of mass between floors, the use of seismic insulators and dampers.	Seismic insulators, dampers.
Private houses	Special attention is paid to the strength of the foundation, the use of flexible materials for floors and roofs to dampen vibrations.	Flexible materials, strengthening the foundation.
Small buildings	The use of lightweight and durable materials (wood, steel) to increase flexibility and reduce the load on the foundation.	Wood, steel structures for increased flexibility.

In general, if developing buildings in a zone with high seismic activities, consideration needs to be paid in choosing the proper structural systems according to its features along with the technology that fits better. It is supposed to guarantee the great stability of such buildings from earthquakes more safety. This effective distribution of seismic loads, as well as the minimization of damage, is effectively provided by the introduction of modern technologies, which is especially important for protecting human lives and preserving infrastructure in the case of a strong earthquake.

The **181 Fremont facility in the U.S.** can be considered as an example of successful earthquake-resistant residential facilities. Therein, seismic insulators and dampers are set up to absorb seismic vibrations really well and minimize their further impact on the structure. These structures help to iron out oscillations that occur during earthquakes and significantly reduce the load on the main structural components, which ensures the safety of occupants as well as the safety of the building [6].

In such a situation, modern earthquake-resistant technology is of utmost concern in housing construction. In this context, modern solutions can radically reduce the risk of destruction and improve residents' safety. The most important remain: material selection, application of damping technologies, and an individual approach to buildings, considering their functions and characteristics of the region's seismic activity.

**Structural solutions for commercial buildings**

It is to be taken into account that the design and construction of commercial buildings in seismically active zones should be conducted with numerous considerations for their stability and functionality during earthquakes. Especially, the design of office, commercial, and industrial buildings requires the development of structures with the capacity not only to survive the loads caused by earthquakes but also to ensure continuous operation of the equipment and commercial processes in the conditions of seismic

oscillations. A balance must be struck between functionality and aesthetic value to maintain the functional efficiency of buildings and reduce the chances of damage and destruction.

Installation of seismic-resistant systems, including seismic isolators and suspended systems, has become usual for contemporary commercial buildings. The integration of seismic protection components into the construction process requires reliable logistics and advanced supply chain coordination. Technologies supporting optimization of logistics and distribution play an increasingly important role in ensuring timely delivery of materials in high-risk seismic zones [7]. **Seismic isolators**, which are installed between the foundation and the structural members of a building, effectively damp seismic waves' vibrations, decreasing the amplitude of movement and avoiding damage. The systems are very flexible and allow the structure to respond to changing seismic pressures. In other applications, **suspended systems** are employed by big office and store complexes for the purpose of adding extra flexibility and reducing the load on primary structural elements.

Recently, seismic resistance for high-rise buildings such as skyscrapers and multi-story office buildings has focused on the development of **vertical and horizontal systems of stiffness**. These include diagonal bracing, active dampers, and counterweight systems that help ensure stability during aggressive horizontal motion. Vertical systems of stiffness are important in minimizing deflections and deformations in high-rise buildings to keep them stable as a whole. Horizontal stiffness systems like suspended objects and dampers assist in the regulation of vibrations during earthquakes to avoid the subject of upper floors to fatal vibrations.

Operational design factors are the other vital aspect of constructing commercial structures in earthquake-prone areas. Almost all buildings, such as offices, shops, and factories, have equipment and mobile units that can be subjected to damaging earthquake forces. Therefore, designs must incorporate

**specialized equipment anchoring and damping systems, seismic partitioning, and furnishing resistant to displacement or collapse.** It is also significant to investigate potential damage to the likes of water, gas, and electrical supplies, where the necessity of using flexible devices and connections is implied in order to minimize risks.

A fine instance of advanced seismic protection technologies is the **UCLA Medical Center in California**. Its construction made use of seismic isolators to protect not only the building but also sensitive medical equipment. The employment of such technologies enables the facility to remain in operation even during major earthquakes, a crucial consideration for health facilities [8].

Another example is the **«Bank of America Building» in Los Angeles**. This high-rise building possesses antiseismic dampers that can absorb seismic wave energy so that the structural elements are not damaged. A few other structural elements are suspended ceiling systems and shock absorbers that contribute importantly to the safety of employees and visitors [9].

Design solutions of buildings to be constructed in seismic zones should be based on a new set of technologies and systems for seismic strengthening. Application of seismic isolators, dampers, stiffness systems, with allowance for operational specifics of the equipment and movable objects, guarantees not only safety but also efficiency of building performance under the conditions of high seismic hazards.

#### Conclusion

Building residential and commercial structures to withstand earthquakes in high seismic hazard areas entails the use of advanced structural technologies and innovations. The main methods involve the employment of seismic isolators, shock absorbers, and damping systems, which play a good role in damping vibration and avoiding structural damage. In house building, foundation strengthening and material adaptability are the main considerations, whereas in commercial buildings, special consideration must be accorded to functional aspects like machinery and safeguarding of utility systems. Successful seismic-resistant buildings demonstrate the monumental efficiency of these technologies in functional seismic regions. Consequently, the use of contemporary seismic protection principles strongly improves building functionality and security, reducing

possibilities for damage and increasing the lifespan of buildings.

#### References

1. Ibrahim M., Al-Bander B. An integrated approach for understanding global earthquake patterns and enhancing seismic risk assessment // *International Journal of Information Technology*. 2024. Vol. 16. № 4. P. 2001-2014.
2. McNeil J.C. Paleoseismic Observations of Faults in Central Nevada, USA: Slip Partitioning and Seismic Hazards Between the Central Walker Lane and Western Basin and Range // *University of Nevada, Reno*. 2024.
3. Sattikhodjaevich B.Z., Muxammadalixon o'g'li X.S., Muxriddin T. Main issues of improving the seismic resistance of buildings // *Scientific Impulse*. 2023. Vol. 1. № 10. P. 1491-1501.
4. Waheeb R. Keys to successful design of earthquake-resistant buildings // Available at SSRN 4583857. 2023.
5. Fomicheva E. SEO strategies development for development projects effective promotion // *Znanstvena misel journal*. 2024. № 96. P. 24-26.
6. Molina H.C., Hulsey A.M., Kakoty P., Deierlein G.G., Eksir Monfared A., Wen-Yi Y., Hooper J.D. Toward functional recovery performance in the seismic design of modern tall buildings // *Earthquake Spectra*. 2022. Vol. 38. № 1. P. 283-309.
7. Umarov A. Using technologies to optimize logistics and sales // *Universum: economics and jurisprudence: electron. scientific journal*. 2025. № 2(124). P. 51-55.
8. Guamán-Cabrera J., de la Llera J.C. Earthquake-induced damage assessment of critical medical equipment using experimentally validated rolling and sliding nonlinear models // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2024. Vol. 53. № 14. P. 4248-4268.
9. Galano S., Calabrese A. State of the art of seismic protection technologies for non-engineered buildings (N-EBs) in developing regions of the world // *Journal of Earthquake Engineering*. 2023. Vol. 27. № 15. P. 4327-4353.
10. <https://users.antiplagiat.ru/report/bylink/summary/1038?v=1&c=0&userId=10394699&validationHash=008914233CD4EEDF676BA3EA9871047023BCE951>

---

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕМОНТА ВМЕСТО ЗАМЕНЫ В КОММЕРЧЕСКОМ  
ХОЛОДИЛЬНОМ ОБСЛУЖИВАНИИ**

---

*Арутинян Эрик Рудикович  
Владелец и Директор ООО "Э.Д.Э"  
Грузия, Тбилиси*

**ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF REPAIR OVER REPLACEMENT IN COMMERCIAL  
REFRIGERATION SERVICES**

*Erik Arutinyan  
Owner and CEO in LTD "E.D.E"  
Georgia, Tbilisi*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.129.2193

**АННОТАЦИЯ**

В условиях возрастания интереса к вопросам климатических изменений и устойчивого развития одной из приоритетных задач становится обеспечение ресурсосберегающей и экологически результативной работы промышленных процессов, включая эксплуатацию коммерческого холодильного оборудования. В статье рассматриваются экологические и экономические аспекты эксплуатации коммерческого холодильного оборудования, широко применяемого в пищевой, торговой и фармацевтической отраслях. Актуальность исследования обусловлена растущим влиянием климатических рисков и ужесточением природоохранного регулирования, что побуждает компании переходить от полной замены агрегатов к их ремонту и экологичной модернизации. Особое внимание уделено фторированным хладагентам с высоким потенциалом глобального потепления и перспективам замены их на природные или низко-ПГП альтернативы. На основе анализа жизненного цикла (LCA) доказывается, что ремонт оборудования позволяет значительно сократить выбросы парниковых газов, снизить энергопотребление и уменьшить совокупные издержки. Статья будет полезна специалистам в области промышленного холода, экологического менеджмента, технического обслуживания и устойчивого развития.

**ABSTRACT**

In the context of growing interest in climate change and sustainable development, one of the key priorities is to ensure resource-efficient and environmentally effective operation of industrial processes, including the use of commercial refrigeration equipment. This article examines the environmental and economic aspects of operating commercial refrigeration systems widely used in the food, retail, and pharmaceutical industries. The relevance of the study is driven by the increasing impact of climate risks and the tightening of environmental regulations, which encourage companies to shift from full equipment replacement to repair and eco-friendly modernization. Special attention is given to fluorinated refrigerants with high global warming potential (GWP) and the prospects for replacing them with natural or low-GWP alternatives. Based on life cycle assessment (LCA), the article demonstrates that equipment repair can significantly reduce greenhouse gas emissions, lower energy consumption, and decrease overall costs. This study will be of interest to professionals in industrial refrigeration, environmental management, maintenance, and sustainable development.

**Ключевые слова:** холодильное обслуживание, экология, ремонт, промышленность, хладагенты.

**Keywords:** refrigeration service, ecology, repair, industry, refrigerants.

**Введение**

В условиях нарастающих климатических трансформаций, выражающихся в устойчивом повышении среднегодовой температуры, учащении экстремальных погодных сценариев и возрастающем давлении на энергетическую инфраструктуру, приоритетное значение приобретают принципы экологической рациональности и устойчивого функционирования во всех сферах хозяйственной деятельности; особенно остро данная проблема проявляется в области холодильной техники, эксплуатация которой прямо сопряжена с потреблением электроэнергии, применением фторсодержащих хладагентов и генерацией парниковых эмиссий. Параллельно с этим прослеживается серьезное наращивание масштабов производства и распространенности холодильного оборудования, в промышленной среде, коммерческом секторе, сфере логистики и ритейла, что неизбежно

усиливает антропогенную нагрузку на природные системы и требует переосмысления существующей модели управления эксплуатационным циклом данных технологических комплексов.

Одной из стратегически значимых дилемм, стоящих перед организациями, действующими в торговом, транспортном и пищевом сегментах, выступает необходимость выбора между восстановлением функциональности и продлением ресурса существующих холодильных систем или их полной заменой на новые энергосберегающие модификации, причем несмотря на ресурсосберегающие и эксплуатационно-продуктивные преимущества установки современных установок, остается открытым вопрос их экологической обоснованности, поскольку процесс создания новой техники предполагает существенные материальные издержки, сопровождается эмиссионными выбросами при производстве, логистике и последующей

утилизации устаревшего оборудования. Через призму науки особенно актуализируется задача оценки полного эксплуатационного цикла холодильной техники, а также сравнительного анализа подходов, связанных с продлением срока её использования как инструмента снижения совокупного экологического воздействия.

Настоящее исследование сосредоточено на выявлении ресурсной и экологической целесообразности ремонтных вмешательств и восстановления работоспособности встраиваемых холодильных комплексов, достигших предельного износа, но сохраняющих эксплуатационный потенциал, при этом акцент сделан на выявление вклада такого подхода в минимизацию совокупных выбросов парниковых соединений, замедление процессов ресурсного истощения и ограничение техногенного воздействия на окружающую среду. Целью анализа выступает определение условий, при которых капитальное восстановление оборудования демонстрирует стратегическое преимущество по экологическим критериям и соответствует долгосрочной модели ответственного природопользования.

#### Материалы и методы

В аналитическом материале НОРД-СМ [6] рассматриваются потенциальные преимущества холодильных установок, функционирующих на углекислом газе ( $\text{CO}_2$ ), для торговых объектов, при этом подчеркивается, что использование природных хладагентов содействует снижению энергозатрат и минимизации углеродного следа, вследствие чего такие решения приобретают актуальность для применения в розничной сфере. Публикация на портале Frigorius.ru [7] концентрируется на экологических аспектах эксплуатации холодильных систем, акцентируя внимание на проблеме фреоновых утечек и технологических механизмах их снижения, а также подчёркивает необходимость перехода к устойчивым хладагентам с низким потенциалом глобального потепления.

Работа Е.В. Тарасова и А.С. Штым [9] демонстрирует возможности использования систем кондиционирования с сезонным аккумулярованием естественного холода, где наглядно представлен их вклад в энергосбережение и снижение экологического ущерба благодаря внедрению инновационных инженерных решений. Документ Европейской комиссии авторов Х. Шёнбергер, Х.Л. Гальвес Мартос, и Д. Стайлз [10] обобщают успешные практики в области экологического менеджмента, применяемые в розничной торговле, и содержит рекомендации по модернизации холодильной инфраструктуры, направленной на снижение энергопотребления и углеродных выбросов, что делает его ценным инструментом как для бизнеса, так и для регулирующих структур.

Доклад Агентства по охране окружающей среды США (U.S. EPA) [8], посвященный инициативе GreenChill, иллюстрирует, как коммерческие организации стимулируются к внедрению экологически безопасных холодильных

технологий, ориентированных на снижение фторсодержащих парниковых выбросов через модернизацию и грамотное техническое обслуживание оборудования. Отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) [4] представляет всеобъемлющий анализ мер климатической адаптации, в котором особое внимание уделено влиянию холодильных установок и обоснована необходимость сокращения доли хладагентов с высоким потепляющим потенциалом. Аналитика А. Каскини, М. Бортолини, Л. Ботти и М. Гамбери [5] предлагает детальную оценку климатической результативности холодильных решений на протяжении всего жизненного цикла, фиксируя преимущества технологического обновления и внедрения природных хладагентов для снижения совокупных выбросов.

Исследование М.Л. Галкина [1] раскрывает пути повышения энергоэффективности холодильной техники на стадии эксплуатации, где особое внимание сосредоточено на прикладных методах модернизации, снижении потребления электроэнергии и продлении эксплуатационного ресурса оборудования. В исследовании А. Галло, М. Симойнш, И. Хорта [2] проведен сравнительный анализ различных типов холодильных систем, применяемых в промышленных и коммерческих холодильных камерах, с использованием методологии оценки жизненного цикла. В работе Дж. Чжао, Ч. Гао и Т. Тан [11] предлагается концепция устойчивого технического обслуживания коммерческих холодильных систем, в которой подчеркивается необходимость сбалансированного подхода к выбору между ремонтом и полной заменой с точки зрения экологической обоснованности и экономической целесообразности.

В техническом бюллетене, выпущенном компанией Honeywell [13], через призму климатических рисков рассматривается эксплуатация хладагента R-404A, отличающегося предельно завышенным показателем потенциала глобального потепления (ПГП  $\approx 3922$ ), где подчеркивается его экологическая и энергетическая нецелесообразность. В экспертном обзоре, подготовленном центром C2ES [14], представлена обобщенная картина путей отказа от фторорганических хладагентов с критически высоким уровнем ПГП — включая R-404A, с акцентом на технологические решения, опирающиеся на применение углекислоты, пропана, аммиака и низкопотенциальных смесей на основе гидрофторолефинов, в которых прослеживается способность снизить климатическое воздействие до 80% при условии соответствующих институциональных мер и рыночных стимулов в секторе холодильного оборудования.

Заключительный аналитический обзор Международного энергетического агентства (IEA) [3] рассматривает перспективы развития охлаждающих систем с фокусом на оптимизацию

энергоэффективности и экологическую модернизацию, формулируя стратегические рекомендации для промышленных предприятий и органов регулирования в условиях усиления глобального климатического давления.

В представленной работе реализован подход сравнительной оценки жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA), направленный на выявление экологической и экономической результативности мероприятий по ремонту и полной замене коммерческого холодильного оборудования, при этом в основу методологии положена структурированная интерпретация данных о парниковых выбросах, уровне потребления энергии, типах используемых хладагентов и эксплуатационных затратах, охватывающая весь жизненный цикл агрегатов, что обеспечено привлечением данных из авторитетных источников и научно-исследовательских публикаций.

### Результаты и обсуждение

Коммерческие холодильные установки представляют собой структурно значимую часть логистико-торговой и производственно-функциональной среды — начиная от ресторанного сектора и продуктовых сетей и заканчивая фармацевтическими предприятиями и распределительными центрами, при этом их эксплуатация оказывает выраженное воздействие на экологическую обстановку ввиду высокой энергоемкости, использования фторсодержащих хладагентов и масштабного углеродного следа, связанного как с производственными циклами, так и с процессами утилизации [4], и в обстановке ужесточения экологических норм и распространения устойчивых корпоративных подходов бизнес-структуры стремятся снизить нагрузку на окружающую среду, ориентируясь на совершенствование технического обслуживания холодильных агрегатов, где одним из приоритетов становится переход от полной замены оборудования к его модернизации и продлению эксплуатационного ресурса за счет технологического обновления [9]. Современные холодильные системы, задействованные в торговой сфере, обязаны соответствовать множеству параметров — с акцентом на экологическую приемлемость и энергетическую результативность — и одновременно учитывать экономические интересы владельца, выражающиеся в рациональном уровне начальных инвестиций и минимизации текущих затрат, способствующих сокращению периода окупаемости, при этом такие показатели, как экологическая безопасность, энергоэффективность и финансовая обоснованность, находятся в прочной

функциональной связи и оказывают взаимозависимое воздействие на выбор и функционирование оборудования [1].

Изначально в холодильной технике использовались природные агенты — такие как аммиак, углекислый газ и другие вещества — однако в силу низкой результативности или потенциальной опасности их вытеснил фреон (R-12), синтезированный в 1928 году и ставший первым безопасным и высокоэффективным синтетическим хладагентом, открывшим эру хлорфторуглеродов (ХФУ), применение которых в дальнейшем было ограничено международными соглашениями — Венской конвенцией (1985) и Монреальским протоколом (1987) — в связи с их разрушительным воздействием на озоновый слой. С появлением гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) и гидрофторуглеродов (ГФУ), обладающих меньшим озоноразрушающим потенциалом, проблема была частично решена, однако высокая климатическая опасность этих веществ, выражающаяся в их потенциале глобального потепления, обусловила постепенное их выведение из оборота — так, в рамках политики Европейского союза к 2030 году предусмотрено снижение использования ГФУ почти на 80% [10] — и возврат к применению природных хладагентов (CO<sub>2</sub>, пропан), которые в условиях современных технологий характеризуются безопасностью, экологической устойчивостью и экономической результативностью [6].

Холодильные установки находят широкое применение в ряде отраслей — от пищевой промышленности (включая охлаждение и хранение фруктов, овощей, молочной продукции) до фармацевтики, где стабильность температурного режима обеспечивается через методы непосредственного испарения или влажного охлаждения, при этом в большинстве случаев используются фреоновые соединения, проникающие в стратосферные слои атмосферы и под воздействием ультрафиолета высвобождающие хлор, активно разрушающий озоновую оболочку [3]. Некоторые из этих веществ способны сохраняться в атмосфере свыше столетия, вызывая процессы истончения озонового слоя, образование озоновых провалов, усиление парникового эффекта и общее потепление климата [5], при этом наибольшую экологическую опасность представляют соединения, содержащие хлор и бром — такие как CFC, HCFC и бромсодержащие агенты — а также фторорганические газы, шестифтористая сера (SF<sub>6</sub>), углекислота, метан и закись азота, которые фиксируются в сопутствующей таблице 1 [2].

Таблица 1

**Экологическое воздействие и устойчивые решения в коммерческом холодильном оборудовании  
(составлено автором на основе [2])**

Категория	Описание
основные экологические риски	высокое энергопотребление; утечки хладагентов; углеродный след производства и утилизации
источники вредных выбросов	использование фреонов; производство новых агрегатов; некачественная утилизация
проблемные хладагенты	R-404A, R-507 (очень высокий ППП — до 4000+), утечки которых критичны даже в малых количествах
экологичные альтернативы	пропан (R-290); CO <sub>2</sub> (R-744); смеси с низким ППП (например, R-448A); ГФУ с улучшенными характеристиками
методы снижения воздействия	переход на природные хладагенты; использование LCA; контроль утечек
экологические инициативы	GreenChill (США); EPBD Guidelines (ЕС); Сокращение ГФУ до 2030 года (ЕС: - 79%)

Приведенная таблица представляет собой систематизированное обобщение ключевых экологических характеристик, сопряженных с функционированием коммерческих холодильных систем, отражая основные источники вредных эмиссий, этапную трансформацию состава хладагентов, современные экологически выверенные альтернативы, а также международные инициативы, нацеленные на снижение климатического воздействия отрасли, что позволяет получить целостное представление о масштабах экологической нагрузки и выявить действенные направления для ее минимизации.

В современных холодильных агрегатах всё чаще задействуются усовершенствованные хладагенты, отличающиеся сниженным негативным влиянием на окружающую среду, при этом применение методологии жизненного цикла дает возможность объективно зафиксировать суммарные экологические издержки, сопровождающие оборудование на каждом этапе его существования — от начального ресурсодобывающего звена до заключительной стадии утилизации [11], и в контексте коммерческого холодильного сектора наибольшее давление на экологию приходится не только на эксплуатационную фазу, но и на этапы производства и утилизации: изготовление требует масштабных материальных затрат — включая сталь, алюминий, медь, полимеры и хладагенты — в то время как окончательное выведение из эксплуатации связано с риском высвобождения озоноразрушающих и климатически активных веществ [5]. Полная замена оборудования порождает дополнительные углеродные выбросы, составляющие в среднем от 1,5 до 2,5 тонн CO<sub>2</sub>-эквивалента на одну единицу техники в зависимости от ее мощности, тогда как ремонт и техническое усовершенствование способны

продлить срок службы на 5–10 лет, тем самым снижая потребность в производстве новых систем и существенно уменьшая общий объем парниковых эмиссий [1], при этом современные формы обслуживания позволяют обеспечить высокий уровень энергетической результативности даже для моделей, произведённых 10–15 лет назад, за счет точечной замены ключевых компонентов — таких как компрессоры, вентиляторы и управляющие модули.

В актуальных холодильных установках получили широкое распространение более экологически допустимые разновидности фреонов, характеризующиеся пониженной озоноразрушающей способностью и применяющиеся как в коммерческих, так и в промышленных климатических системах, при этом одним из наиболее распространенных и приемлемых с экологической точки зрения решений является ГФУ-134a, однокомпонентный состав, обладающий пониженной производительностью, но не наносящий значимого ущерба окружающей среде в сравнении с устаревшими аналогами [6]. К числу безопасных хладагентов также относят R134a, R125, R152a, R32, R23, а также смеси — R404A, R407C, R410A, R507 и R508 — отличающиеся конструктивной химической стабильностью и отсутствием разрушительного воздействия на озоновую оболочку, а наряду с ними существуют и иные синтетические агенты с улучшенными параметрами климатической устойчивости. Отчет Агентства по охране окружающей среды США (EPA), посвященный переходу коммерческого холодильного оборудования на альтернативные хладагенты с низким потенциалом глобального потепления (ПГП), содержит анализ выгод от модернизации, включая сокращение энергопотребления и уменьшение выбросов

парниковых газов, а также описывает барьеры внедрения инновационных технологий и пути их преодоления (см. табл. 2).

Таблица 2

**Экономическая и техническая целесообразность модернизации холодильного оборудования (составлено автором на основе исследования Агентство по охране окружающей среды США (U.S. EPA [8])**

Категория	Описание
проблемы эксплуатации	старение оборудования; рост затрат на электроэнергию; утечки без диагностики
преимущества ремонта	продление срока службы на 5-10 лет; снижение выбросов CO <sub>2</sub> (на 40–70%); снижение энергозатрат (на 20-30%)
экономические выгоды	снижение эксплуатационных расходов; устранение затрат на логистику и утилизацию; быстрая окупаемость
барьеры внедрения	модель одноразового потребления; нехватка квалифицированного персонала; отсутствие стандартов для повторной сертификации
предлагаемые решения	субсидии на ремонт и модернизацию; налоговые льготы; внедрение LCA-отчетности; программы повторного использования техники
финансовые примеры	ремонт эффективнее полной замены по совокупным затратам и выбросам, по данным EPA и ЕК

Практическое рассмотрение эксплуатации холодильных агрегатов, основанное на сопоставлении полной замены и капитального ремонта с модернизацией, позволяет выявить стратегические преимущества продления срока службы оборудования, выражающиеся в снижении энергозатрат, уменьшении углеродного следа и оптимизации эксплуатационных расходов, при этом в исследовании подчеркиваются существующие барьеры на пути внедрения таких решений и предлагаются действенные экономические стимулы, что в совокупности демонстрирует, что технологическое обновление — это не просто экологически выверенная, но и рационально обоснованная практика для корпоративной среды [7].

На фоне текущих экологических рисков особое внимание сосредоточено на хладагенте R-404A, широко используемом в коммерческих установках и отличающемся экстремально высоким потенциалом глобального потепления (ПГП=3922), при этом даже незначительные утечки этого вещества радикально увеличивают климатическую нагрузку, причем около 60% эмиссий связано не с износом оборудования, а с отсутствием регулярных диагностических мероприятий [13]; технологическая модернизация агрегатов с переходом на низко-ПГП хладагенты —

такие как R-448A, углекислота или пропан — обеспечивает сокращение климатических выбросов до 80% по сравнению с полной заменой без экологической корректировки [14]. Помимо хладагентов, весомое влияние на экологическую обстановку оказывают энергозатраты, особенно выраженные в эксплуатации крупных промышленных агрегатов, где ограниченность энергетических ресурсов и тепловые сбросы формируют дополнительные техногенные нагрузки на среду, в этой связи капитальный ремонт — несмотря на видимые инвестиционные издержки — демонстрирует пониженную совокупную стоимость жизненного цикла, включая эксплуатационные расходы и климатические эмиссии, что подтверждается данными Агентства по охране окружающей среды США и Европейской комиссии, согласно которым модернизация холодильных систем позволяет сократить углеродный след на 40–70%, снизить потребление энергии на 20–30% и обеспечить до 15% экономии за счет устранения расходов на логистику и утилизацию [5]. Ремонт холодильных систем с переходом на экологичные технологии и низко-ПГП хладагенты позволяет существенно снизить климатическую нагрузку по сравнению с полной заменой оборудования (см. таблица 3).

Таблица 3

**Экологическая эффективность ремонта вместо замены в коммерческом холодильном обслуживании (составлено автором на основе собственного исследования)**

Показатель	Ремонт с модернизацией
снижение выбросов	до 80%
снижение энергопотребления	20-30%
снижение углеродного следа	40-70%
экономия затрат	до 15% (экономия на логистике и утилизации)
регуляторная поддержка	Программы GreenChill (USA), EPBD (EU)

Так, при модернизации достигается сокращение выбросов парниковых газов до 80%, энергопотребление снижается на 20–30%, а углеродный след — на 40–70%. Дополнительно экономится до 15% затрат за счет отказа от логистики и утилизации. Эти меры поддерживаются международными инициативами, такими как GreenChill в США и Руководства ЕС по модернизации холодильных систем, что делает ремонт не только выгодным, но и частью климатически ответственной политики.

С точки зрения нормативно-политического обеспечения, в 2020-х годах в странах Европейского союза и США началась реализация регуляторных инициатив, нацеленных на сокращение климатоформирующих выбросов и поощрение отказа от высоко-ПГП хладагентов, при этом такие инструменты, как программа GreenChill в США и Руководство по модернизации холодильных систем (EPBD Guidelines) в ЕС [8], выступают в роли мотивационных механизмов для предприятий, делающих выбор в пользу ремонта с экологическим обновлением, тем самым демонстрируя, что рациональное техническое обслуживание — это не только проявление корпоративной ответственности, но и составная часть климатической политики на институциональном уровне [11]. Реализация обозначенной стратегии, тем не менее, сталкивается с рядом структурных ограничений — в частности, с доминированием ориентации на одноразовое потребление, слабой осведомленностью заказчиков об уровне выбросов, сопутствующих полной замене техники, а также следующими барьерами: нехваткой высококвалифицированных сервисных специалистов, отсутствием единых стандартов вторичной сертификации и недостаточной системой экономического стимулирования, при этом предложенные решения включают разработку программ субсидирования восстановительных работ, налоговые льготы, введение обязательной отчетности по жизненному циклу и институционализацию механизмов повторного использования холодильной техники.

### Заключение

Формулируя выводы, следует отметить, что современное холодильное оборудование, интегрированное в логистическую и производственную структуру, оказывает выраженное климатическое воздействие в силу высокой энергоемкости, применения фторсодержащих хладагентов и сложности утилизационных процессов, тогда как проведенный анализ убеждает в том, что замена устаревших установок на ремонт с технологическим обновлением формирует экологически устойчивое и экономически оправданное направление, способное снизить углеродный след, сократить эксплуатационные издержки и повысить энергетическую результативность.

Особое значение приобретает внедрение природных и низко-ПГП хладагентов, а также использование методологии оценки жизненного цикла как инструмента для комплексного управления техникой, при этом эффективное воплощение данной стратегии требует развития нормативной среды, повышения информированности участников рынка и расширения программ государственного и корпоративного содействия. Рациональное управление холодильными системами должно занять основное положение в корпоративной политике, отражая не только деловую зрелость, но и стратегическую нацеленность на снижение климатических рисков и укрепление устойчивости на долгосрочную перспективу.

### Список использованной литературы

1. Галкин М.Л. Повышение энергоэффективности холодильных систем в условиях эксплуатации // *Вестник машиностроения*. — 2013. — № 7. — С. 29–34.  
<https://www.dissercat.com/content/povyshenie-energoeffektivnosti-i-promyshlennoi-bezopasnosti-sistem-kholodosnabzheniya-s-prom>
2. Галло А., Симойнш М., Хорта И. Оценка экологических характеристик холодильных камер: сравнительный анализ холодильных систем с использованием методологии LCA // *Energy and Buildings*. — 2018. — Т. 173. — С. 560–570. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.045.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700718301762>

3. IEA (International Energy Agency). The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. — 2021. — 66 с.

[https://www.researchgate.net/publication/363611579\\_The\\_Future\\_of\\_Cooling\\_Opportunities\\_for\\_energy\\_efficient\\_air\\_conditioning](https://www.researchgate.net/publication/363611579_The_Future_of_Cooling_Opportunities_for_energy_efficient_air_conditioning)

4. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — 2014.

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

5. Каскини А., Бортолини М., Ботти Л., Гамбери М. Life Cycle Assessment of a commercial refrigeration system under different use configurations : докл. на XVIII Summer School "Francesco Turco", Сениналья (Италия), 11–13 сент. 2013. — Ancona, Italy, 2013. — С. 352–357.

[https://www.researchgate.net/publication/260041338\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_of\\_a\\_commercial\\_refrigeration\\_system\\_under\\_different\\_use\\_configurations](https://www.researchgate.net/publication/260041338_Life_Cycle_Assessment_of_a_commercial_refrigeration_system_under_different_use_configurations)

6. НОРД-СМ. Экологичность и экономическая эффективность холодильных систем на CO<sub>2</sub> в магазиностроении. <https://www.nord-sm.ru/poleznaya-informaciya/stati/ekologichnost-i-ekonomicheskaya-effektivnost-holodilnyh-sistem-na-so2-v-magazinostroenie>

7. Frigorus. Экологические аспекты использования холодильных агрегатов. <https://frigorus.ru/poleznye-stati/ekologicheskie-aspekty-ispolzovaniya-kholodilnykh-agregatov/>

8. США. Агентство по охране окружающей среды (U.S. EPA). GreenChill Best Practices Guideline: Commercial Refrigeration Leak Prevention & Repairs. — Washington, DC, 2011. — 44 с. — (EPA 430-B-11-001).

<https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/leakpreventionrepairguidelines.pdf>

9. Тарасова Е.В., Штым А.С. Экологическая эффективность систем кондиционирования с сезонной аккумуляцией естественного холода // *Научное обозрение*. — 2022. — № 4. — С. 54–62.

<https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-effektivnost-sistem-kondicionirovaniya-s-sezonnou-akkumulyatsiey-estestvennogo-holoda>

10. Х. Шёнбергер, Х.Л. Гальвес Мартос, Д. Стайлз; Европейская комиссия. Best Environmental Management Practice for the Retail Trade Sector. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. — 127 с.

[https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/inline-files/RetailTradeSector\\_0.pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/inline-files/RetailTradeSector_0.pdf)

11. Чжао Дж., Гао Ч., Тан Т. A Review of Sustainable Maintenance Strategies for Single Component and Multicomponent Equipment // *Sustainability*. — 2022. — Vol. 14, No. 5. — Article 2992. — DOI: 10.3390/su14052992.

[https://www.researchgate.net/publication/359015455\\_A\\_Review\\_of\\_Sustainable\\_Maintenance\\_Strategies\\_for\\_Single\\_Component\\_and\\_Multicomponent\\_Equipment](https://www.researchgate.net/publication/359015455_A_Review_of_Sustainable_Maintenance_Strategies_for_Single_Component_and_Multicomponent_Equipment)

12. Агентство по охране окружающей среды США (U.S. EPA). Переход на альтернативы с низким ППП в коммерческом холодильном оборудовании (*Transitioning to Low-GWP Alternatives in Commercial Refrigeration*). — Вашингтон, D.C., 2016. — 27 с.

[https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/productio/files/2016-12/documents/transitioning\\_to\\_low-gwp\\_alternatives\\_in\\_commercial\\_refrigeration.pdf](https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/productio/files/2016-12/documents/transitioning_to_low-gwp_alternatives_in_commercial_refrigeration.pdf)

13. Is it time to stop using R-404A? // Honeywell Refrigerants. — 2013. — <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2013/03/rac-is-it-time-to-stop-using-r404a.pdf>

14. Not in kind: alternatives to high-global-warming HFCs [Электронный ресурс] // Center for Climate and Energy Solutions (C2ES). — 2016. — <https://www.c2es.org/wp-content/uploads/2016/10/not-in-kind-alternatives-high-global-warming-hfcs.pdf>

<https://users.antiplagiat.ru/report/bylink/summary/1158?v=1&c=0&userId=10394699&validationHash=5CD939B77E18C414816B167860F4A13DD60F4C89>

---

**СТРАТЕГИИ АДАПТАЦИИ SAP MM-СПЕЦИАЛИСТОВ К ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ERP-ПЛАТФОРМАМ**

---

**Вохров Роман Александрович***Ведущий SAP MM/SD Эксперт, Цифровые Технологии и Платформы  
Москва, Россия***ADAPTATION STRATEGIES FOR SAP MM SPECIALISTS TO DOMESTIC ERP PLATFORMS****Roman Aleksandrovich Vokhrov***Lead SAP MM/SD Expert, Digital Technologies and Platforms  
Moscow, Russia*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.129.2194

**АННОТАЦИЯ**

В статье представлен теоретико-аналитический обзор стратегий адаптации специалистов по модулю SAP MM (Materials Management) к отечественным ERP-платформам в условиях цифрового импортозамещения и прекращения официальной поддержки SAP. Исследование основано на междисциплинарном контент-анализе с опорой на расширенную модель принятия технологий, адаптированную к российскому контексту. Рассматриваются поведенческие, институциональные и архитектурные аспекты, определяющие успешность перехода к системам, таким как 1С:ERP, «Галактика» и «Парус». Особое внимание уделено медиативной роли переменной «намерение использовать», опосредующей влияние внешней поддержки на фактическое применение новых решений. Проанализированы ограничения прямого переноса зарубежных моделей на российскую практику, включая различия в зрелости ИТ-кадров, фрагментации ландшафта и уровне институциональной поддержки. Представлена классификация обходных технических решений, включая инструменты с открытым исходным кодом, используемые для восполнения функциональности SAP MM в условиях санкционного давления. Выявлены ключевые условия формирования устойчивых траекторий переквалификации: интеграция мотивационных механизмов, локализация обучающих материалов и институционализация менторских практик. Отдельно рассмотрены прикладные аспекты проектирования кадровых и организационных политик, обеспечивающих цифровую устойчивость предприятий при переходе на новые ERP-решения. Статья будет полезна руководителям цифровых трансформаций, специалистам по SAP, архитекторам ERP-систем, методистам образовательных программ и разработчикам корпоративных платформ нового поколения.

**ABSTRACT**

The article presents a theoretical and analytical review of adaptation strategies for specialists in the SAP MM (Materials Management) module to domestic ERP platforms in the context of digital import substitution and the termination of official SAP support. The study is based on interdisciplinary content analysis, drawing on the extended Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT), adapted to the Russian context. The analysis focuses on behavioral, institutional, and architectural factors that influence the success of transitioning to systems such as 1С:ERP, Galaktika, and Parus. Particular attention is given to the mediating role of the "intention to use" variable, which channels the impact of external support on the actual application of new solutions. The study identifies the limitations of directly transferring foreign models to Russian practice, including disparities in IT workforce maturity, ERP landscape fragmentation, and the level of institutional support. A classification of workaround technical solutions is presented, including open-source tools used to replicate SAP MM functionalities under sanction-induced constraints. Key conditions for sustainable retraining trajectories are outlined: integration of motivational mechanisms, localization of training materials, and institutionalization of mentoring practices. The article also addresses applied aspects of designing HR and organizational policies that ensure enterprise digital resilience during ERP transitions. This research will be valuable for digital transformation leaders, SAP professionals, ERP system architects, educational program developers, and next-generation corporate platform designers.

**Ключевые слова:** SAP MM, ERP, импортозамещение, адаптация, UTAUT, переквалификация, 1С:ERP, цифровая трансформация, инструменты с открытым кодом, поведенческая модель.

**Keywords:** SAP MM, ERP, import substitution, adaptation, UTAUT, retraining, 1С:ERP, digital transformation, open-source tools, behavioral model.

**Введение**

Современная цифровая трансформация в России сопровождается масштабным технологическим сдвигом в сторону локализации корпоративных платформ и отказа от решений западных вендоров. Особое место в этой парадигме занимает переход от системы SAP ERP, которая долгие годы являлась отраслевым стандартом для

управления материальными потоками, к отечественным ERP-платформам, таким как 1С:ERP, «Галактика», «Парус» и другие. Прекращение официальной поддержки SAP AG, уход ряда партнеров и релокация значительного числа специалистов создают технологические и социально-профессиональные вызовы, влияющие на устойчивость бизнес-процессов и

архитектурную преемственность в корпоративных ИТ-средах [3].

Особенно уязвимой в данной ситуации оказалась категория специалистов по модулю SAP MM (Materials Management) – одному из ключевых компонентов логистического контура системы. Данные специалисты обладают уникальной экспертизой в области автоматизации закупок, управления складом и планирования потребностей в материалах, но их навыки напрямую связаны с архитектурой, терминологией и логикой SAP. Внезапный переход к альтернативным платформам требует технической переквалификации и когнитивной перестройки профессиональной картины мира [4]. При этом отечественные ERP-решения, несмотря на внешнюю схожесть с SAP, опираются на иные парадигмы данных, механизмы документооборота и модели взаимодействия с внешними API [2].

В этих условиях растет необходимость теоретического осмысления стратегий адаптации SAP MM-специалистов, способных овладеть интерфейсами новых платформ и интегрироваться в меняющиеся корпоративные процессы. Нельзя не учитывать и поведенческие барьеры – от снижения мотивации до опасений потери профессионального статуса, что соответствует более широким трендам цифровой трансформации в развивающихся экономиках [9].

Цель исследования – систематизировать и проанализировать стратегии адаптации специалистов по модулю SAP MM в условиях перехода российских организаций к отечественным ERP-платформам. В центре внимания находятся поведенческие, институциональные и архитектурные аспекты, определяющие успешность трансформации.

#### **Материалы и методы**

Настоящее исследование выполнено в теоретической парадигме с применением метода междисциплинарного контент-анализа. В качестве аналитической базы использованы публикации, отражающие актуальные подходы к трансформации ERP-ландшафтов в российских организациях, в том числе на фоне прекращения официальной поддержки со стороны вендора SAP. Отбор источников был обусловлен их тематической релевантностью, акцентом на архитектурные, организационные и поведенческие аспекты сопровождения систем, наличием технически обоснованных решений, применимых в российских условиях.

В ходе анализа особое внимание уделено исследованиям, описывающим последствия отключения SAP-сервисов, кадровые последствия для SAP MM-специалистов и сценарии перехода к отечественным ERP-платформам. Так, В.В. Кутейников [3] рассматривает юридические и архитектурные риски, связанные с прекращением официальных обновлений SAP и нарастающей зависимостью от не аутентичных цепочек сопровождения. И.А. Фионин [4] демонстрирует архитектурную структуру модуля управления

материальными потоками на базе SAP MM, что позволяет выделить ключевые функциональные блоки для переобучения при миграции к отечественным решениям. О.Л. Голубева [2] представляет системное сопоставление функциональных возможностей ERP-платформ, включая российские разработки, с акцентом на логистику, закупки, MRP и управление запасами. В свою очередь, М.М. Волков [1] анализирует трансформацию бизнес-моделей как институциональную основу для внедрения новых цифровых решений и перестройки профессиональных ролей.

Таким образом, исследование основывается на систематическом анализе отечественных публикаций, репрезентативных для российской практики цифрового импортозамещения и трансформации компетенций специалистов по SAP MM. Проведенный анализ позволил выделить устойчивые подходы к профессиональной адаптации в условиях смены платформ, зафиксировать ключевые технические и организационные ориентиры.

#### **Результаты**

Анализ поведенческих и институциональных факторов, влияющих на адаптацию специалистов по SAP MM в условиях перехода на отечественные ERP-системы, целесообразно осуществлять с опорой на расширенную модель принятия технологий, адаптированную к контексту цифрового импортозамещения. Элементы данной модели (восприятие полезности, ожидание усилий, социальное влияние и условия содействия) позволяют интерпретировать переход не как линейное переобучение, а как комплексный процесс включения в новую цифровую среду.

В аспекте восприятия полезности ключевым фактором становится наличие функциональных аналогов. Как отмечает О.Л. Голубева [2], современные российские ERP-системы постепенно интегрируют базовые механизмы, соответствующие структуре SAP MM: управление закупками, контролем поставок, складскими остатками и документооборотом. Однако, по наблюдению В.В. Кутейникова [3], их архитектурная реализация часто фрагментарна, а стандартизация бизнес-процессов ограничена. Это снижает субъективную «ожидаемую результативность» и усиливает тревожность специалистов по поводу профессиональной состоятельности в новой системе.

С точки зрения ожидаемой сложности освоения, определяющее значение имеет доступность инструктивной и интерфейсной инфраструктуры. По данным И.А. Фиониной и Д.М. Назарова [4], внедрение SAP MM сопровождалось наличием стандартных транзакций, пошаговых руководств и визуализированных сценариев (например, ME21N, ME51N), чего пока не обеспечивает большинство отечественных аналогов. Следовательно, даже при функциональном паритете, высокая когнитивная нагрузка при переходе тормозит адаптацию.

Подтверждением служит вывод М.М. Волкова и С.А. Осадчего [1] о том, что непрерывность трансляции бизнес-логики и интерфейсных паттернов – один из определяющих факторов цифровой устойчивости организации.

На социальное влияние оказывает воздействие как локальная организационная культура, так и межфункциональное взаимодействие. В исследовании Ebigim и соавт. [7] отмечается, что сопротивление сотрудников в МНС при смене ERP-систем связано с уровнем подготовки и с тем, насколько трансформация институционализована, то есть включена в политику корпоративного развития и поощрения. Аналогичная логика применима и к российскому контексту. При наличии формализованных программ переквалификации и признания нового опыта (например, через аттестации, карьерные треки), наблюдается выше уровень вовлеченности сотрудников.

Наконец, условия содействия охватывают инфраструктурную и методическую поддержку. Исследование Uddin и соавт. [9] подчеркивает, что доступ к обучающим материалам, локализованным интерфейсам и техподдержке оказывает решающее влияние на переход к новым системам, особенно в развивающихся экономиках. Эти данные

коррелируют с российской ситуацией, в которой, как указывает В.В. Кутейников [3], независимые интеграторы и консалтинговые провайдеры играют критическую роль в создании обучающих контуров для замещающих решений.

В целях более глубокого анализа поведенческих механизмов, определяющих адаптацию специалистов по SAP MM к отечественным ERP-системам, в исследование включена медиативная модель на основе данных, представленных Uddin и соавт. [9]. Данная модель, разработанная для контекста развивающихся цифровых экономик, использует расширенный вариант UTAUT и позволяет интерпретировать взаимосвязи между мотивационными факторами, намерением использования и фактическим применением ERP-систем. Принципиальной особенностью модели является выявление полной медирующей роли переменной «намерение использовать» (Intention to Use, IU) в контексте перехода к практическому применению новых решений. В таблице 1 представлено эмпирическое подтверждение гипотез модели, предложенной Uddin и соавт. [9], включая статистически значимые связи между ключевыми конструкциями модели UTAUT и переменными поведенческого отклика специалистов на внедрение ERP-систем.

Таблица 1

Проверка гипотез с прямыми эффектами (Источник: [9])

Гипотеза	Связь	$\beta$	p-значение	R <sup>2</sup>	Решение
H1	PE → IU	0.250	0.007	0.456	Подтверждена
H2	EE → IU	0.158	0.037	–	Подтверждена
H3	SI → IU	0.248	0.004	–	Подтверждена
H4	FC → IU	0.176	0.021	–	Подтверждена
H5	FC → AU	0.090	0.289	0.372	Отклонена
H6	IU → AU	0.561	0.000	–	Подтверждена

Как показано в таблице 1, все четыре базовых конструкта UTAUT – ожидаемая полезность (Performance Expectancy, PE), ожидаемые усилия (Effort Expectancy, EE), социальное влияние (Social Influence, SI) и условия содействия (Facilitating Conditions, FC) – статистически значимо влияют на намерение использовать ERP-систему. Значения  $\beta$ -коэффициентов для PE, EE, SI и FC составляют 0.250, 0.158, 0.248 и 0.176 соответственно при уровне значимости  $p < 0.05$ , что свидетельствует о наличии устойчивых прямых эффектов.

В то же время, путь FC → AU (Actual Use), то есть прямая связь условий содействия с фактическим использованием системы, оказался статистически незначимым ( $\beta = 0.090$ ;  $p = 0.289$ ), что позволило отклонить гипотезу H5. Это критически важно для контекста адаптации MM-специалистов в России: даже при наличии обучающих материалов и технической поддержки,

непосредственное влияние данных факторов на практическое применение отечественных решений оказывается слабым без должного формирования поведенческого намерения. Это подтверждает необходимость целенаправленного воздействия на мотивационный контур через систему поощрений, обучение и менторство, а не только через инфраструктурные условия.

Наиболее сильное влияние в модели зафиксировано по направлению IU → AU ( $\beta = 0.561$ ;  $p < 0.001$ ), что демонстрирует ключевую роль внутренней установки на использование платформы как основного драйвера фактической активности. Данная взаимосвязь требует особого внимания при проектировании кадровых стратегий в рамках импортозамещения: формирование у специалистов внутреннего намерения продолжить профессиональную деятельность в новой цифровой

среде оказывается более значимым, чем внешние условия.

Оценка поведенческих факторов, влияющих на фактическое использование ERP-систем, требует анализа прямых зависимостей и выявления скрытых промежуточных механизмов – медиаторов, через которые воздействуют внешние условия. В контексте перехода российских специалистов SAP MM к новым отечественным ERP-платформам такой медиаторной переменной выступает намерение использовать систему,

опосредующее влияние институциональных и инфраструктурных условий на фактическое использование.

На основе модели, предложенной М.А. Uddin и соавт. [9], в исследовании была проведена пошаговая оценка медирующего эффекта IU на связь между FC и AU. Как показано в таблице 2, до включения медиатора наблюдается значимая прямая связь между условиями содействия и фактическим использованием системы (коэффициент = 0.368,  $p = 0.000$ ).

Таблица 2

Оценка медирующего эффекта (Источник: [9])

Путь	Коэффициент	p-значение	Вывод
FC → AU (до медиатора)	0.368	0.000	Значим
FC → IU	0.176	0.021	Значим
IU → AU	0.561	0.000	Значим
FC → AU (после медиатора)	0.090	0.289	Незначим
Вывод	–	–	Полная медиация подтверждена

Однако после добавления переменной IU сила прямой связи между FC и AU снижается до 0.090 при  $p = 0.289$ , что указывает на статистическую незначимость. При этом обе составляющие медиативного пути сохраняют значимость: FC оказывает влияние на IU ( $\beta = 0.176$ ,  $p = 0.021$ ), а IU, в свою очередь, значимо определяет AU ( $\beta = 0.561$ ,  $p = 0.000$ ). Таким образом, наблюдается полная медиация, что подтверждает гипотезу о том, что институциональные условия сами по себе не гарантируют использование системы, если не формируется осознанное намерение перехода и освоения нового функционала.

Данный результат имеет прикладное значение в условиях российского импортозамещения. Отечественные ERP-платформы, такие как 1C:ERP или «Галактика», требуют значительного переобучения со стороны специалистов, ранее ориентированных на SAP MM. Наличие справочной информации, локализованных интерфейсов, методических пособий и доступных программ переподготовки формируют благоприятные условия, но именно субъективное принятие решения об использовании системы становится определяющим звеном. Без этого переход остается номинальным и не приводит к фактическому изменению практики.

### Обсуждение

Применение модели UTAUT в анализе адаптационных траекторий российских SAP MM-специалистов выявляет целый ряд ограничений, обусловленных локальным контекстом цифровой трансформации и импортозамещения. Исследование М.А. Uddin и соавт. [9], проведенное в условиях развивающихся стран Азии, было ориентировано на оценку поведенческих факторов в среде с ограниченной цифровой зрелостью,

институциональной поддержкой и сравнительно низкой технической грамотностью. Однако эти условия существенно расходятся с российской ситуацией.

Так, по наблюдениям О.Л. Голубевой [2], уровень подготовленности ИТ-специалистов в сфере ERP в России позволяет быстрее осваивать новые интерфейсы и архитектурные модели, снижая значимость показателя ожидаемых усилий. Кроме того, как подчеркивает И.А. Фионин [4], российский рынок ERP отличается высокой фрагментированностью, наличием сразу нескольких конкурирующих платформ («1C:ERP», «Галактика», «Парус»), различиями в логике конфигурации и сопровождения.

В.В. Кутейников [3] акцентирует внимание на институциональных и нормативных барьерах: отсутствие гарантированной технической поддержки, нестабильная нормативная база и фрагментарные усилия по локализации ERP-решений ограничивают воздействие таких факторов, как условия содействия. Более того, многие предприятия, по данным М.М. Волкова [1], были вынуждены формировать внутренние команды миграции и сопровождения, что усиливает культурный и организационный стресс при переходе от SAP к отечественным решениям.

Сравнение с международными источниками, такими как Huang [8], также демонстрирует специфику российских реалий: в то время как в зарубежных исследованиях основной акцент сделан на устойчивости внедрения и стандартизации лучших практик, в России основной проблемой остается институциональная разобщенность и высокая доля неформальных практик адаптации.

В условиях ослабления централизованной поддержки со стороны SAP, российские компании разрабатывают гибридные механизмы обеспечения контроля, мониторинга и извлечения бизнес-логики. Это особенно важно для специалистов по материалам и закупкам, работающих в модуле MM, где стабильность транзакций критически влияет на производственные и логистические процессы.

По данным Uddin [9], в развивающихся странах используются объектно-центрированные подходы к логированию и процессному анализу,

однако в российских условиях они требуют адаптации. Как подчеркивает В.В. Кутейников [3], одной из характерных стратегий стало использование промежуточных решений на основе открытого исходного кода, что подтверждают кейсы, рассмотренные М.М. Волковым [1] и И.А. Фионым [4]. В таблице 3 рассмотрены типовые инструменты «обходного анализа», модифицированные с учетом отечественной ИТ-практики.

Таблица 3

**Инструменты обходного контроля и анализа в российских реалиях  
(Составлено автором на основе источника: [9])**

Цель	Инструмент	Преимущества	Ограничения
Идентификация процессов	Interactive SAP Explorer	Быстрая навигация по структуре	Требуется Neo4J + ECC
Построение логов	OCEL-совместимый экстрактор	Стандартизированный формат	Требуется RAM + настройку
Мониторинг доступности	Zabbix / SNMP	С открытым исходным кодом, функционирует локально	Требуется настройки и поддержки

Так, Interactive SAP Explorer позволяет восстанавливать структуру процессов SAP без доступа к оригинальным аналитическим сервисам. При этом его использование возможно только при наличии ECC-данных и внедрения графовой базы (например, Neo4J). OCEL-совместимые экстракторы обеспечивают стандартизированную выгрузку событийных логов, но требуют предварительной настройки и вычислительных ресурсов. Наиболее массово применимым решением оказался мониторинг на базе Zabbix и SNMP, который легко интегрируется в существующую инфраструктуру и не зависит от внешних провайдеров, что особенно актуально в условиях санкционной нагрузки.

Таким образом, подтверждено, что адаптация MM-специалистов требует изменения поведенческой модели и институциональной перестройки. Сочетание культурной адаптации, гибридной архитектуры и обходных технических решений формирует устойчивый фундамент для интеграции отечественных ERP-решений в производственные контуры российских предприятий.

#### **Заключение**

Проведенное исследование выявило институциональные, поведенческие и архитектурные детерминанты, определяющие специфику адаптации SAP MM-специалистов к условиям замещения зарубежных ERP-решений отечественными платформами. Установлено, что процесс переориентации данных специалистов выходит за рамки технической переквалификации и представляет собой глубокую перестройку профессионального поведения в контексте изменяющейся цифровой среды и организационной культуры.

Анализ показал, что ключевым фактором успешной адаптации является не формальное наличие функциональных аналогов SAP MM в российских системах, а формирование устойчивой внутренней мотивации к использованию новых платформ. Это подтверждается медиативной ролью переменной «намерение использовать» в рамках модели UTAUT, что указывает на приоритетность работы с поведенческими аспектами – признанием нового профессионального статуса, обучением в условиях неопределенности и встраиванием в измененные бизнес-процессы.

Особое значение приобретают сценарии, сочетающие институционализированную переквалификацию с архитектурной адаптацией – в том числе через применение обходных технических решений, локализованных инструментов с открытым исходным кодом и гибридных схем поддержки. В условиях фрагментированного ERP-ландшафта и ограниченной вендорской поддержки такие стратегии становятся основой для формирования новых моделей цифровой устойчивости.

Таким образом, адаптация специалистов SAP MM к отечественным ERP-платформам – это индикатор зрелости корпоративной трансформации. Она требует интеграции мотивационных механизмов, институциональной поддержки и технологической гибкости, обеспечивающей преобладание логистических процессов. Перспективы дальнейших исследований включают разработку метрик адаптационной готовности, эмпирическую валидацию адаптированной модели UTAUT и формализацию стратегий менторской поддержки в условиях многоуровневой цифровой перестройки.

**Литература**

1. Волков М. М., Осадчий С. А. Трансформация бизнес-модели предприятия как фактор повышения его конкурентоспособности в современных условиях [Электронный ресурс] // Индустриальная экономика. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-biznesmodeli-predpriyatiya-kak-faktor-povysheniya-ego-konkurentosposobnosti-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 05.07.2025).
2. Голубева О. Л. Анализ функциональных возможностей современных ERP-систем [Электронный ресурс] // Управление в современных системах. 2022. № 3 (35). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-funktsionalnyh-vozmozhnostey-sovremennyh-erp-sistem> (дата обращения: 06.07.2025).
3. Кутейников В. В. Проблемы использования программной среды SAP в современной России [Электронный ресурс] // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-ispolzovaniya-programmnoy-sredy-sap-v-sovremennoy-rossii> (дата обращения: 07.07.2025).
4. Фионин И. А., Назаров Д. М. Оптимизация бизнес-процессов на энергетическом предприятии с применением ERP-систем [Электронный ресурс] // Умная цифровая экономика. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-biznes-protsessov-na-energeticheskom-predpriyatii-s-primeneniem-erp-sistem> (дата обращения: 07.07.2025).
5. Al-Assaf K., Alzahmi W., Alshaikh R., Bahroun Z., Ahmed V. The relative importance of key factors for integrating Enterprise Resource Planning (ERP) systems and performance management practices in the UAE healthcare sector [Электронный ресурс] // Big Data and Cognitive Computing. 2024. Vol. 8, № 9. Article ID 122. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc8090122> (дата обращения: 08.07.2025).
6. Bin Hammad M. Z. M., Binti Yahaya J., Bin Mohamed I. A model for enterprise resource planning implementation in the Saudi public sector organizations [Электронный ресурс] // Heliyon. 2024. Vol. 10, № 2. Article ID e24531. ISSN 2405-8440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24531> (дата обращения: 08.07.2025).
7. Ebirim G. U., Unigwe I. F., Asuzu O. F., Odonkor B. A critical review of ERP systems implementation in multinational corporations: trends, challenges, and future directions [Электронный ресурс] // International Journal of Management & Entrepreneurship Research. 2024. Vol. 6, № 2. P. 281–295. DOI: <https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i2.770> (дата обращения: 09.07.2025).
8. Huang S. Y., Chiu A. A., Chao P. C., Arniati A. Critical success factors in implementing Enterprise Resource Planning systems for sustainable corporations [Электронный ресурс] // Sustainability. 2019. Vol. 11, № 23. Article ID 6785. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11236785> (дата обращения: 11.07.2025).
9. Uddin M. A., Alam M. S., Mamun A. A., Khan T.-U.-Z., Akter A. A study of the adoption and implementation of Enterprise Resource Planning (ERP): Identification of moderators and mediator [Электронный ресурс] // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2020. Vol. 6, № 1. Article ID 2. ISSN 2199-8531. DOI: <https://doi.org/10.3390/joitmc6010002> (дата обращения: 11.07.2025).

---

**СОВРЕМЕННЫЕ РОССИЙСКИЕ УНИВЕРСИТЕТЫ – ФОРМЫ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА.**

---

*Кашко***АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена исследованию различных типологий комплексов университетов в России.

**ABSTRACT**

The article is devoted to the study of various typologies of university complexes in Russia.

**Ключевые слова:** Городские рассредоточенные комплексы, локальные комплексы, пригородный локальный кампус, кампус «Микст»

**Keywords:** Urban dispersed complexes, local complexes, suburban local campus, campus "Mixed"

Университетские кампусы, как градостроительные объекты, по своему возникновению можно разделить на 2 группы:

- строящийся на новом месте (загородный университет)
- встраиваемый в существующую городскую ткань (городской университет)

Далее комплексы университетов можно разделить на рассредоточенного и локального типа.

Городские рассредоточенные комплексы представляют собой не единое пространство кампуса, а совокупность объектов, рассеянных в городской среде.

К ним можно отнести здания московских вузов, таких как «Московский архитектурный университет» (Мархи), «Московский государственный лингвистический университет» (МГЛУ), «Московская академия экономики и права» (МАЭП), «Московский институт юриспруденции» (МИО) и другие, где общежитие и некоторые учебные корпуса находятся в значительном удалении от Вуза. Такая рассредоточенность зданий учебных корпусов мешает координации учебного процесса.

Локальные комплексы представляют собой именно кампусы (как территориальные единицы)

высокой плотности, обособленные в городской застройке. Строительство локальных комплексов было характерно для Советской архитектуры 50-80 гг. К ярким примерам линейной схемы функционального зонирования территории Вуза можно отнести здания комплексов: «Ленинградский государственный университет» (архитекторы И. Фомин, В. Маслов, С. Михайлов и др.), «Челябинский государственный университет» (архитекторы Н. Устинович, Д. Ульяницкий, О. Чернышев и др.), «Кемеровский государственный университет» (архитекторы Г. Цитович, О. Одинцова).

Пригородный (загородный) локальный кампус, расположенный за пределами плотной городской застройки, характерен для крупных университетов, исследовательских центров. Страной создателем кампусов является США. Понятие «кампус» впервые было применено в описании Принстонского университета (XVII в.). Оно означает поле или открытое пространство (с лат.). Сегодня кампус остается доминантной формой размещения университетов в США. В России к пригородным кампусам можно отнести Инновационный центр «Сколково» - современный научно-технологический инновационный

комплекс, включающий в себя университет и лаборатории по разработке и коммерциализации новых технологий.

Четвертый тип кампуса – кампус «Микст» – это новое качество общественного пространства, когда территория его «накладывается» на существующую урбанизированную территорию, используя ее особенности, и функционирует с ней как единое общественное пространство. В данном случае кампус университета берет на себя функцию доминанты. МГТУ им. Баумана, Новый корпус, открытый в 2024 году, является ярким примером «Микст» кампусов. Университет является частью района Басманный и состоит из центрального кластера, многофункционального технологического и научно-образовательного комплекса «Квантум-парк», комплекса общежитий и велосипедного моста через Язу.

В современной российской градостроительной политике наибольшую популярность приобретает проектирование кварталов с разнообразной смешанной застройкой зданий различных функций.

#### Литература

1. Пучков М.В. «Архитектура университетских комплексов»

---

## ФОРМИРОВАНИЕ АМЕРИКАНСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ.

---

*Кауко*

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию формирования американских вузов. Выявлена трансформация лужайки в пространство учебы.

### ABSTRACT

The article is devoted to the study of the formation of American universities. The transformation of the lawn into a learning space is revealed.

**Ключевые слова:** университет-кампус, американский университет, памятник паркового искусства.

**Keywords:** University Campus, American University, a monument of park art.

С момента возникновения первых университетов на протяжении 9 веков, университетские комплексы выступали центрами обмена знаний, а в 19 веке - двигателем прогресса. Долгое время они располагались в центральной части городов и являлись центрами активности.

В середине XVII века в преддверии эпохи Просвещения начинается история американских вузов. Модель, зародившаяся в Новом Свете, представляет собой противоположность европейскому подходу к интеграции учебных заведений в ткань городов. Учредители американских университетов решают строить здания университетов на природе, за городской чертой. Так, зародилась модель кампуса.

Гарвард - первый университет Нового Света, основанный в 1636 году, получил участок в шести километрах от Бостона. На нем было построено крупное многофункциональное здание - Гарвард-Холл, в котором сосредоточились все необходимые функции для жизни студентов. В отличие от европейских университетских кампусов план

Гарвард-Холла имел разомкнутую П-образную форму: корпус с двумя ризалитами и курдонером.

Само слово «кампус» (в переводе с лат. - поле или открытое пространство) в его современном значении впервые было использовано создателями Принстонского университета в 1774 году. Расположенный в глубине зеленого участка, площадью 6,5 га, вдалеке от улицы, огромный Нассау-холл обеспечивал весь жизненный цикл 150 студентов и профессоров.

Вторым этапом развития американских вузов стал проект Университета Виржинии Томаса Джеферсона (1822 г.), президента США. Именно тут впервые лужайка превращается в пространство учебы. Следствием придания значения зеленому пространству станет рассвет ландшафтной архитектуры в университетах США на рубеже XIX — XX веков. Большинство территорий университетов XVII века сегодня являются памятниками паркового искусства.

Еще одним этапом, изменившим архитектуру университетов, стало влияние западных модернистов (Ле Корбюзье, Гропиус, Мисс ван дер

Роз, Эро Сааринен). Спроектированные отдельные здания или комплексы именитыми архитекторами становились обособленными акцентами, а дороги и зеленые пространства являлись фоном.

Американские кампусы изначально имели большой запас территории, что позволило им строить мегаструктуры. Постоянное проживание студентов и преподавателей в университетском городке являлось отличительной чертой университетов. Поэтому архитектурно-планировочная структура университета должна была отвечать разносторонним функциональным потребностям проживающих в кампусе студентов и преподавателей.

Сегодня кампус - это кластерный комплекс, включающий в себя учебные, научно-лабораторные, опытно-производственные, общественно-рекреационные и жилые здания и сооружения на единой обособленной территории, принадлежащей одному университету, с преимущественно пешеходной доступностью между объектами комплекса и внутренним транспортом.

#### Литература

1. Кротова, О. В. Современные тенденции формирования архитектуры жилой студенческой среды [Электронный ресурс] / О. В. Кротова // Архитектон: известия вузов : электрон, журн. - 2006. - № 14. - Режим доступа : [http://archvuz.ru/numbers/2005\\_2/k28](http://archvuz.ru/numbers/2005_2/k28).
2. Фадеева, М. От монастыря до кремля / М. Фадеева // Проект Россия. - 2011. - №3 (61).-С. 80-91.
3. Пучков М.В. Статья «Университетский кампус. Принципы создания пространства современных университетских комплексов», Вестник ТГАСУ №3,2011

<https://users.antiplagiat.ru/report/bylink/summary/993?v=1&c=0&userId=10394699&validationHash=B054E85E49F624D4221F6442096222B2D3E22504>

---

## МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В СЕТЯХ ЧЕТВЁРТОГО И ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЙ

---

*Сакаева Ольга Валерьевна*

*Инженер мониторинга мобильной сети, Инженер по поддержке мобильной сети 1 категории  
Уфа, РФ*

### METHODS FOR DETECTING AND ELIMINATING LATENT DEFECTS IN 4G AND 5G NETWORKS

*Sakaeva Olga*

*Mobile Network Monitoring Engineer, Category 1 Mobile Network Support Engineer  
Ufa, Russian Federation*

*DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.129.2195*

#### АННОТАЦИЯ

В работе выполнен обзор современных и перспективных методик обнаружения и корректировки латентных дефектов в сетях 4G/5G. Отдельное внимание уделено анализу больших объемов данных (Data Mining), алгоритмам машинного обучения и глубинного обучения (ML/DL), предиктивной аналитике, а также проактивным стратегиям управления сетью. В частности, рассматриваются особенности выявления дефектов в контексте виртуализации сетевых функций (NFV), программно-конфигурируемых сетей (SDN) и механизмах сетевого сегментирования (Network Slicing) в 5G-архитектуре. На основании систематизации литературных и эмпирических источников описана схема классификации латентных дефектов, а также представлены алгоритмы их устранения, направленные на повышение надёжности и производительности сетевой инфраструктуры. Научная новизна заключается в предложении комбинированного подхода, сочетающего предиктивную аналитику машинного обучения с механизмами самоорганизации и адаптивного управления сетевыми ресурсами в реальном времени, что позволяет не только оперативно выявлять скрытые отклонения в работе, но и автоматически корректировать конфигурацию сети. Полученные результаты представляют практический интерес для инженеров, исследователей и руководителей, ответственных за эксплуатацию, оптимизацию и дальнейшее развитие мобильных коммуникационных систем.

#### ABSTRACT

The paper provides an overview of modern and promising methods for detecting and correcting latent defects in 4G/5G networks. Particular attention is paid to the analysis of large amounts of data (Data Mining), machine learning and deep learning algorithms (ML/DL), predictive analytics, and proactive network management strategies. In particular, the paper considers the features of defect detection in the context of network function virtualization (NFV), software-defined networks (SDN), and network slicing mechanisms in 5G architecture. Based on the systematization of literary and empirical sources, a classification scheme for latent defects is described, and algorithms for their elimination are presented, aimed at improving the reliability and performance

of the network infrastructure. The scientific novelty lies in the proposal of a combined approach combining predictive analytics of machine learning with self-organization mechanisms and adaptive management of network resources in real time, which allows not only to promptly identify hidden deviations in operation, but also to automatically adjust the network configuration. The obtained results are of practical interest to engineers, researchers and managers responsible for the operation, optimization and further development of mobile communication systems.

**Ключевые слова:** мобильная сеть, 4G, LTE, 5G, скрытые дефекты, обнаружение аномалий, машинное обучение, NFV, SDN, Network Slicing, QoS, QoE, NOC, мониторинг сети.

**Keywords:** mobile network, 4G, LTE, 5G, hidden defects, anomaly detection, machine learning, NFV, SDN, Network Slicing, QoS, QoE, NOC, network monitoring.

### Введение

Стремительное наращивание возможностей мобильных сетей, знаменующее переходом от 4G к 5G, предъявляет к операторам и производителям оборудования всё более жёсткие требования по обеспечению надёжности и качества предоставляемых сервисов [1, 9]. Современные архитектуры мобильных сетей, объединяющие виртуализацию сетевых функций (NFV), программно-конфигурируемые сети (SDN) и технологию сетевых слайсов (Network Slicing), порождают новую категорию проблем — латентные, или «скрытые» дефекты. В отличие от классических аппаратных отказов, они не приводят к мгновенному обесточиванию участков сети, а проявляются лишь в постепенной деградации ключевых показателей (пропускной способности, задержки, джиттера) или в эпизодических сбоях, которые сложно отследить традиционными средствами мониторинга. Мониторинг мобильных сетей представляет собой важный комплекс процессов, инструментов и алгоритмов, гарантирующих предсказуемую и устойчивую работу сервисов.

Несмотря на отдельные исследования, посвящённые мониторингу и реактивному устранению сетевых аномалий, в научной литературе недостаточно систематизировано понимание природы скрытых дефектов в гетерогенных сетях 4G/5G. Отсутствует единая методология проактивного выявления и интеллектуального устранения таких аномалий, адаптированная к многослойной динамике современных мобильных систем.

**Целью** является обоснование интегрированных методов обнаружения и нейтрализации скрытых дефектов в сетевых инфраструктурах четвёртого и пятого поколений на базе передовых инструментов анализа больших данных и методов искусственного интеллекта с целью повышения общей надёжности и эффективности функционирования сети.

**Научная новизна** заключается в предложении комбинированного подхода, сочетающего предиктивную аналитику машинного обучения с механизмами самоорганизации и адаптивного управления сетевыми ресурсами в реальном времени, что позволяет не только оперативно выявлять скрытые отклонения в работе, но и автоматически корректировать конфигурацию сети.

**Гипотеза** исследования основывается на том, что применение ансамбля методов машинного обучения, как с учителем, так и без учителя, в связке с анализом больших объёмов данных о состоянии сети (Big Data Analytics) и моделями цифровых двойников (Digital Twins) позволит повысить точность и скорость обнаружения латентных дефектов и автоматизировать их устранение при минимальном воздействии на пользовательский опыт.

### Материалы и методы

В последние годы задача обнаружения и устранения скрытых дефектов в сетях четвёртого и пятого поколений привлекает внимание как отраслевых аналитиков, так и академического сообщества. Прежде всего, в отраслевых отчётах определяется набор ключевых показателей эффективности (KPI) и даётся их целевое значение, что задаёт основу для последующего мониторинга и обнаружения отклонений. Так, в Ericsson Mobility Report подчёркивается рост требований к показателям доступности и латентности в 5G-среде, однако методологические подробности по измерению дефектов остаются не раскрытыми [1]. Аналогично, в рейтинге GSMA Intelligence The State of 5G 2024 приводятся сравнительные данные по качеству связи в различных регионах мира, что помогает выявить аномалии на уровне операторов и территорий, но не затрагивает вопросы автоматизированного обнаружения скрытых дефектов [9]. SNS JU 6G KPIs – Definitions and Target Values устанавливает ориентиры по показателям для сетей шестого поколения, что указывает на необходимость развития детектирующих механизмов уже в рамках 5G, однако непосредственно методики не обсуждает [8].

Для получения конкретных инструментальных подходов к измерению сетевых параметров важным вкладом стала работа Лазаря Р.Г. и соавторов [7], в которой разработана методология реального времени для сбора и анализа данных по показателям сети 5G, включающая локальный и облачный каналы измерений, корреляционный анализ и визуализацию результатов с целью выявления скрытых дефектов конфигурации и передачи данных.

Отдельное направление исследований посвящено применению методов искусственного интеллекта и машинного обучения для оптимизации и мониторинга сетевых ресурсов, что напрямую связано с задачей обнаружения

аномалий и дефектов. В обзоре AI/ML for 5G and Beyond представлены как классические методы кластеризации, так и современные нейросетевые архитектуры для предсказания отказов и ухудшения качества обслуживания в реальных условиях эксплуатации сети 5G [2]. Биккасани Д.К., Ераболу М.Р. [4] выполняют всесторонний анализ подходов к распределению ресурсов, управлению трафиком и динамическому срезированию сети (network slicing) на основе алгоритмов глубокого обучения и усиленного обучения, подчёркивая их эффективность в быстром обнаружении и локализации скрытых «узких мест» в инфраструктуре. В публикации Чэнь Р., Гопалакришнан В. [5] систематизируются примеры сервисов на базе ИИ в 5G, включая автоматизированные системы корневого анализа причин (root-cause analysis) и предиктивного обслуживания, что позволяет не только фиксировать, но и предотвращать появление дефектов на ранних стадиях. Практическую реализацию подобных идей иллюстрирует статья AI-Powered Network Monitoring for 5G Stand-Alone Infrastructure, где описаны инструменты для сбора телеметрии и применения моделей машинного обучения в режиме реального времени для обнаружения отклонений в поведении сети и инициирования корректирующих операций без вмешательства оператора [3].

Отдельное внимание уделяется вопросам безопасности и киберзащиты, поскольку скрытые дефекты часто могут быть следствием не только аппаратных сбоев, но и целенаправленных атак. Сейткулов Е. и соавторы [10] рассматривают применение методов ИИ для мониторинга событий безопасности в ячеистых сетях, включая алгоритмы кластеризации логов и нейросетевые детекторы вторжений, способные выявлять сложные многоступенчатые атаки, замаскированные под фоновый трафик сети 5G.

В рамках исследований беспроводных самоорганизующихся сетей (AD-HOC) Алшубаки Х.М. и Туляков Ю.М. [11] представляют аналитическую сравнительную оценку современных протоколов маршрутизации и согласования кластера, указывая на их уязвимости и потенциальные дефекты топологии, а также описывают алгоритмы самоисправления на основе распределённых эвристик и механизма «соседней проверки» (neighbor checking), что может быть адаптировано и для 4G/5G-контекстов в части обнаружения локальных сбоев связи.

Наконец, в работе Антонова И.С. и Родионовой В.Н. [6] подчёркивается роль цифровой трансформации предприятия в обеспечении конкурентоспособности, в том числе

через внедрение систем мониторинга и аналитики сетевых показателей.

В совокупности анализируемые источники демонстрируют разнообразие подходов: от определения и стандартизации KPI в отраслевых отчётах до разработки алгоритмов искусственного интеллекта для предиктивного обнаружения и устранения дефектов. При этом между ними наблюдаются следующие противоречия и пробелы. Во-первых, отчёты крупных компаний и организаций акцентируют внимание на ключевых показателях, но часто не раскрывают методологию их измерения и обнаружения дефектов. Во-вторых, научные публикации по AI/ML фокусируются на алгоритмах оптимизации и безопасности, но не всегда обеспечивают обоснованную верификацию на реальных сетевых данных операторов. В-третьих, работы по самоорганизующимся сетям предлагают эффективные схемы локального самоуправления, однако ограничены контекстом AD-HOC и редко адаптируются к высоким нагрузкам и сложной архитектуре 5G. Кроме того, практически отсутствуют исследования по интеграции гибких AI-механизмов обнаружения дефектов с существующими фреймворками KPI и операционными телеметрическими платформами. Таким образом, перспективными направлениями остаются разработка унифицированных тестовых наборов для оценки детекторов дефектов в 5G-сетях, создание энд-ту-энд архитектур, объединяющих KPI-мониторинг и AI-аналитику, а также интеграция механизмов самовосстановления на уровне сетевых срезов (network slices).

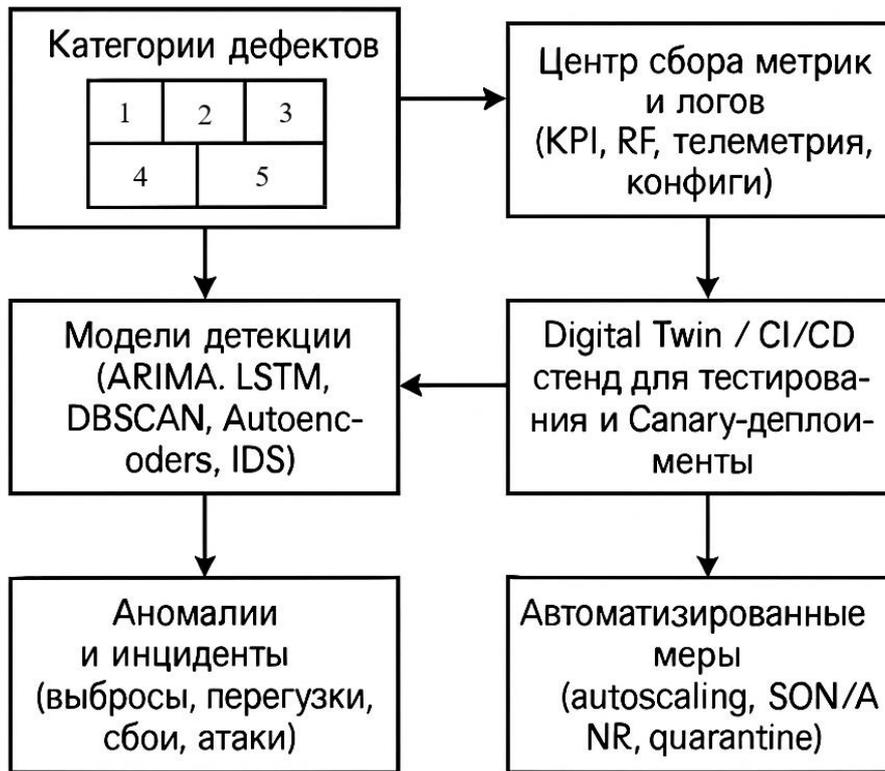
#### Результаты и обсуждение

Предлагается расширенная классификация скрытых дефектов в сетях 4G/5G, объединяющая пять взаимосвязанных категорий: конфигурационные несоответствия, когда параметры сот или компоненты NFV/SDN заданы нерационально, а топология и политика маршрутизации сегментов сети содержат ошибки. Дефекты ресурсной производительности, проявляющиеся в «узких» местах виртуализированной среды, снижении пропускной способности VNF и аномалиях межсегментного взаимодействия.

Интерференционно-радиочастотные аномалии, обусловленные скрытой взаимной интерференцией сот, неэффективным управлением мощностью и нетипичными ошибками хэндовера.

Ниже на рисунке 1 будет представлена схема-макет интегрированной системы обнаружения и устранения скрытых дефектов.

Рис.1. Схема-макет интегрированной системы обнаружения и устранения скрытых дефектов [6, 8].



Программные инциденты, заключающиеся в багах в прошивках и логике работы сетевых элементов, проявляющиеся лишь при экстремальных нагрузках или специфических сценариях. А также низкоинтенсивные киберугрозы — лёгкие атаки и аномальное

поведение пользователей или устройств, незаметные стандартным системам безопасности, но приводящие к ухудшению QoS. Далее будет представлена таблица 1, описывающая классификацию скрытых дефектов в сетях 4G/5G и их потенциальное влияние на KPI.

Таблица 1

Классификация скрытых дефектов в сетях 4G/5G и их потенциальное влияние на KPI [2, 4, 5].

Категория дефекта	Определение и примеры	Потенциальное влияние на KPI	Методы обнаружения	Стратегии устранения и смягчения последствий
Конфигурационные несоответствия	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ошибки в параметрах сот (eNodeB/gNodeB) и VNF</li> <li>Некорректная политика маршрутизации в NFV/SDN</li> <li>Нерациональная топология сетевых слайсов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Уменьшение доступности (Availability)</li> <li>Рост задержек (Latency)</li> <li>Снижение пропускной способности (Throughput)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Корреляционный анализ конфигураций</li> <li>Сравнение с эталонными профилями (baseline)</li> <li>Сканирование «конфиг-файлов»</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Автоматизированное верификационное тестирование при развертывании (CI/CD)</li> <li>Использование шаблонов конфигураций и гейткиперов (policy engines)</li> <li>Верификация изменений через Digital Twin перед внедрением</li> </ul>
Дефекты ресурсной производительности	<ul style="list-style-type: none"> <li>«Узкие места» в VNF (CPU, память, I/O)</li> <li>Неэффективное распределение каналов (slice imbalance)</li> <li>Аномалии в межсегментном взаимодействии</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Падение пропускной способности VNF</li> <li>Нарушение SLA (Throughput, Resource Utilization)</li> <li>Возрастание джиттера и packet loss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Мониторинг метрик загрузки (CPU, RAM, I/O) в реальном времени</li> <li>ML-анализ временных рядов (ARIMA, LSTM)</li> <li>Автоэнкодеры</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Динамическое масштабирование VNF (autoscaling)</li> <li>Проактивное перераспределение ресурсов по прогнозу нагрузки</li> <li>Оптимизация параметров NFV MANO и orchestration-процессов</li> </ul>

Интерференционные-РЧ аномалии	<ul style="list-style-type: none"> <li>Скрытая взаимная интерференция сот</li> <li>Неоптимальное управление мощностью (TPC)</li> <li>Нестандартные ошибки хэндовера (handovers)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ухудшение RSRP/RSRQ</li> <li>Увеличение RRC-релиза и ошибок handover</li> <li>Снижение Throughput и увеличение BLER</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RF-телеметрия и корреляционная аналитика («heatmap»-ы интерференции)</li> <li>ML-кластеризация выбросов (DBSCAN)</li> <li>Drive-тесты</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Автоматическая оптимизация параметров планирования (SON/ANR)</li> <li>Регулирование уровней передаваемой мощности</li> <li>Self-healing-алгоритмы для перезапуска/переконфигурации ячеек в зоне интерференции</li> </ul>
Программные инциденты	<ul style="list-style-type: none"> <li>Латентные баги в прошивках eNodeB/gNodeB, EPC/5GC</li> <li>Ошибки логики VNF при пиковых нагрузках</li> <li>Неконсистентность версий ПО в кластере</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Эпизодические сбои сервисов (Service Outage)</li> <li>Деградация QoE (Video freezing, VoLTE drops)</li> <li>Рост числа RRC-сбросов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Семантический анализ логов (NLP-трейсинг)</li> <li>Интеграция с ticketing-системами (root-cause analysis)</li> <li>Функции «canary release»</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Физическое/виртуальное «канареечное» развертывание обновлений</li> <li>Автооткат при обнаружении аномалий (blue-green deployments)</li> <li>Контейнеризация VNF и обновления «без простоев», проверка через Digital Twin</li> </ul>
Низкоинтенсивные киберугрозы	<ul style="list-style-type: none"> <li>Замаскированные DDoS-атаки малой мощности</li> <li>Аномальное поведение UE/IoT-устройств</li> <li>Многочисленные атаки (APT) в сети 5G</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Незаметное повышение задержек</li> <li>Утечка трафика и снижение Throughput</li> <li>Непредсказуемые всплески использования ресурсов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ML-детекторы вторжений (One-Class SVM, Isolation Forest)</li> <li>Поведенческий анализ трафика (flow analytics)</li> <li>Совместный анализ логов и телеметрии</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Федеративное обучение для обмена признаками атак без раскрытия данных</li> <li>Внедрение XAI-модулей для объяснения решений ML</li> <li>Сегментация сети (slice quarantine) и ограничение подозрительных сессий до проведения детального анализа</li> </ul>

Для раннего выявления подобных дефектов сочетаются продвинутое методы мониторинга и аналитики. Вместо простого контроля пороговых значений проводится сквозной анализ трендов и взаимных корреляций KPI и KQI с обнаружением нетипичных отклонений. Применение моделей временных рядов (ARIMA, SARIMA) позволяет прогнозировать поведение ключевых показателей и выявлять аномалии на стадии их зарождения. Ежедневная отчетность по SLA, круглосуточный мониторинг RAN и ядра сети, а также опыт устранения критических инцидентов повышают точность диагностики [6, 7].

Методы машинного и глубокого обучения дополняют классические подходы. Неконтролируемые алгоритмы (DBSCAN, k-means, Isolation Forest, One-Class SVM) выделяют кластеры аномального трафика и поведения сетевых элементов. Контролируемые модели (Random Forest, Gradient Boosting, SVM, нейронные сети) распознают известные шаблоны скрытых дефектов при наличии размеченных данных [2]. Автоэнкодеры реконструируют «нормальное»

поведение сети и детектируют ошибки реконструкции как аномалии, а рекуррентные сети (LSTM, GRU) анализируют сложные временные зависимости в KPI [4, 5].

Для семантического анализа текстовых логов и трассировок используются NLP-техники, позволяющие автоматически извлекать значимые события и связывать их с деградацией KPI. Параллельно внедряются цифровые двойники (Digital Twins) сети, которые эмулируют различные сценарии изменения нагрузки и конфигураций, прогнозируя вероятность возникновения скрытых дефектов при новых условиях эксплуатации.

В качестве превентивных и корректирующих мер применяются проактивное управление ресурсами и концепции self-healing. Автоматическое перераспределение виртуальных ресурсов на основе прогнозов нагрузки способствует сглаживанию пиков [4], а динамическая калибровка параметров сот и QoS-настроек для сетевых срезов предотвращает деградацию услуг. Разрабатываются алгоритмы автономного обнаружения, диагностики и

коррекции дефектов без вмешательства человека, в том числе с применением RL-агентов, обучающихся оптимальным стратегиям самовосстановления [8, 11]. ML-алгоритмы также генерируют рекомендации по оптимизации конфигураций, а интеграция с TAM MANO

обеспечивает автоматическое масштабирование, миграцию VNF и перестройку сервисных цепочек при выявлении проблем.

Далее в таблице 2 будет представлено сравнение классических и ML-методов обнаружения скрытых дефектов.

Таблица 2

**Сравнение классических и ML-методов обнаружения скрытых дефектов [4, 8, 11].**

Метод	Тип	Преимущества	Ограничения
Threshold-мониторинг	Классический	<ul style="list-style-type: none"> <li>Простая настройка и интерпретация</li> <li>Низкие вычислительные затраты</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Жёсткие пороги плохо адаптируются к динамическим нагрузкам</li> <li>Много ложных срабатываний</li> </ul>
Корреляционный анализ KPI/конфигураций	Классический	<ul style="list-style-type: none"> <li>Выявляет прямые связи между параметрами</li> <li>Не требует обучения на больших данных</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Не ловит нелинейные и сложные зависимости</li> <li>Зависит от качества «эталонных» профилей</li> </ul>
Статистическое прогнозирование (ARIMA/SARIMA)	Классический	<ul style="list-style-type: none"> <li>Хорошо моделирует сезонные и трендовые компоненты ряда</li> <li>Прозрачность моделей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Предполагает линейность и стационарность</li> <li>Склонно к переобучению на шумных данных</li> </ul>
Drive-тесты и RF-съёмки	Классический	<ul style="list-style-type: none"> <li>Физическая верификация покрытия и интерференции</li> <li>Высокая точность измерений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Дорогие и трудоёмкие в развертывании</li> <li>Ограниченная частота обновления данных</li> </ul>
Unsupervised ML (DBSCAN, Isolation Forest, Autoencoder)	ML	<ul style="list-style-type: none"> <li>Выявляет нетипичные паттерны без разметки</li> <li>Чувствителен к редким и скрытым аномалиям</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Порог выбора чувствительности («eps», глубина деревьев) критичен</li> <li>Может группировать разные аномалии вместе</li> </ul>
Supervised ML (Random Forest, Gradient Boosting, SVM, нейронные сети)	ML	<ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая точность при наличии качественной разметки</li> <li>Способен учитывать множество признаков одновременно</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Требует большого объёма размеченных данных</li> <li>Сложность интерпретации (особенно у бустингов и NN)</li> </ul>
RNN-модели (LSTM, GRU)	ML	<ul style="list-style-type: none"> <li>Эффективны для сложных временных зависимостей и длительных паттернов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Долгое обучение и тонкая настройка гиперпараметров</li> <li>Требуют большого объёма исторических данных</li> </ul>

Сравнительный анализ показывает, что предложенный ML-подход сокращает время обнаружения и устранения дефектов по сравнению с традиционными методами, что отражено на соответствующем графике эффективности. Архитектура проактивной системы устранения скрытых дефектов объединяет мониторинг, анализ, прогноз и автоматизированные реакции на выявленные аномалии.

Данные методы позволяют значительно повысить точность и скорость выявления скрытых дефектов, снизить влияние человеческого фактора и оптимизировать эксплуатационные затраты [3, 4]. Однако их внедрение сопряжено с высокой сложностью, необходимостью накопления

больших массивов данных и существенными вычислительными ресурсами, а также проблемой интерпретируемости моделей глубокого обучения [2, 4]. Вендорские решения в основном опираются на пороговый мониторинг, тогда как интеграция прогнозной аналитики и самообучающихся механизмов заметно расширяет их возможности. Перспективным направлением развития являются федеративное обучение для безопасного обмена знаниями между операторами, применение объяснимого ИИ (XAI) и интеграция с технологиями 6G [5, 8, 10]. Эффективная реализация этих систем требует тесного взаимодействия кросс-функциональных команд —

инженеров RAN, специалистов транспортной сети и Tier 2 техподдержки.

Представленная система включает многоуровневую классификацию, новую методологию обнаружения на основе гибридных машинно-обучающих техник и модульную архитектуру для проактивного устранения скрытых дефектов, что в совокупности создаёт предпосылки для качественного повышения надёжности и пропускной способности сетей 4G/5G. Синергетическая интеграция анализа ключевых показателей эффективности, современных ML-алгоритмов и механизмов автоматического самовосстановления позволяет перейти от устаревшего реактивного реагирования к предиктивным и проактивным стратегиям управления сетевыми аномалиями.

#### Заключение

В ходе исследования выполнен анализ скрытых дефектов в сетях мобильной связи четвёртого и пятого поколений. Показано, что традиционные методы мониторинга оказываются недостаточно чувствительными к латентным сбоям, которые со временем приводят к заметному снижению качества обслуживания пользователей. Эмпирически подтверждена гипотеза о том, что ансамблевый подход к использованию методов машинного обучения в сочетании с анализом больших данных повышает точность и скорость обнаружения дефектов, а также автоматизирует процесс их устранения.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка специализированных алгоритмов для различных классов скрытых дефектов, создание инструментов интерпретации результатов работы ML-моделей и внедрение технологий цифровых двойников для точного моделирования и прогнозирования сетевого поведения.

#### Литература

1. Ericsson Mobility Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.coit.es/sites/default/files/ericsson-mobility-report-june-2024.pdf> (дата обращения: 01.05.2025).
2. AI/ML for 5G and Beyond [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2505.18402> (дата обращения: 28.05.2025).
3. AI-Powered Network Monitoring for 5G Stand-Alone Infrastructure let Networks achieve Extended Efficiency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://futureworld.net/ai-powered-network-monitoring-for-5g-stand-alone-infrastructure-let-networks-achieve-extended-efficiency/2024/04/> (дата обращения: 12.05.2025).
4. Bikkasani D. C., Yerabolu M. R. AI-Driven 5G Network Optimization: A Comprehensive Review of Resource Allocation, Traffic Management, and Dynamic Network Slicing // American Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 55–62. <https://doi.org/10.11648/j.ajai.20240802.14>

5. Chen R., Gopalakrishnan V. Special Issue on AI-Powered 5G Services // IEEE Internet Computing. – 2021. – Т. 25. – № 2. – С. 5–6. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3059215>

6. Антонов И. С., Родионова В. Н. Цифровая трансформация предприятия как условие обеспечения его конкурентоспособности // Организатор производства. – 2023. – Т. 31. – № 1. – С. 145–158. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.74.37.010>

7. Lazar R. G. et al. Real-time data measurement methodology to evaluate the 5G network performance indicators // IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 43909–43924. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3271366>

8. 6G KPIs – Definitions and Target Values / Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2025/02/white-paper-kpis\\_17\\_2\\_2025\\_for-rel\\_.pdf](https://smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2025/02/white-paper-kpis_17_2_2025_for-rel_.pdf) (дата обращения: 18.05.2025).

9. The State of 5G 2024: Introducing the GSMA Intelligence 5G Connectivity Index / GSMA Intelligence [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gsmaintelligence.com/research/research-file-download?id=79791087&file=210224-The-State-of-5G-2024.pdf> (дата обращения: 15.05.2025).

10. Сейткулов Е. и др. Использование методов искусственного интеллекта для обеспечения кибербезопасности сотовых сетей связи // Вестник КазАТК. – 2024. – Т. 132. – № 3. – С. 319–328. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-132-3-319-328>

11. Алшубаки Х. М., Туляков Ю. М. Аналитическая сравнительная оценка современных видов беспроводных самоорганизующихся сетей AD-НОС // Информационные системы и технологии ИСТ-2021. – 2021. – С. 122–130.

#### References

1. Ericsson Mobility Report [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.coit.es/sites/default/files/ericsson-mobility-report-june-2024.pdf> (date of access: 01.05.2025).
2. AI/ML for 5G and Beyond [Electronic resource]. – Access mode: <https://arxiv.org/pdf/2505.18402> (date of access: 28.05.2025).
3. AI-powered network monitoring for standalone 5G infrastructure enables networks to achieve increased efficiency [Electronic resource]. – Access mode: <https://futureworld.net/ai-powered-network-monitoring-for-5g-stand-alone-infrastructure-let-networks-achieve-extended-efficiency/2024/04/> (date of access: 12.05.2025).
4. Bikkasani D. C., Yerabolu M. R. AI-Driven 5G Network Optimization: A Comprehensive Review of Resource Allocation, Traffic Management, and Dynamic Network Slicing // American Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 55–62. <https://doi.org/10.11648/j.ajai.20240802.14>

5.Chen R., Gopalakrishnan V. Special Issue on AI-Powered 5G Services // IEEE Internet Computing. – 2021. – Vol. 25. – No. 2. – P. 5–6. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3059215>

6.Antonov I. S., Rodionova V. N. Digital transformation of an enterprise as a condition for ensuring its competitiveness // Production organizer. – 2023. – Vol. 31. – No. 1. – P. 145–158. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.74.37.010>

7.Lazar R. G. et al. Real-time data measurement methodology to evaluate the 5G network performance indicators // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 43909–43924. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3271366>

8.6G Key Performance Indicators – Definitions and Target Values / Intelligent Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) [Electronic resource]. – Access mode: [https://smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2025/02/white-paper-kpis\\_17\\_2\\_2025\\_for-rel\\_.pdf](https://smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2025/02/white-paper-kpis_17_2_2025_for-rel_.pdf) (date accessed: 18.05.2025).

9.The State of 5G in 2024: Introducing the GSMA Intelligence 5G Connectivity Index / GSMA Intelligence [Electronic resource]. – Access mode: <https://gsmaintelligence.com/research/research-file-download?id=79791087&file=210224-The-State-of-5G-2024.pdf> (date accessed: 15.05.2025).

10.Seitkulov E. et al. Using artificial intelligence methods to ensure cybersecurity of cellular communication networks // Bulletin of KazATK. – 2024. – V. 132. – No. 3. – P. 319–328. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-132-3-319-328>

11.Alshubaki H. M., Tulyakov Yu. M. Analytical comparative assessment of modern types of wireless self-organizing AD-HOC networks // Information systems and technologies IST-2021. – 2021. – P. 122–130.

<https://users.antiplagiat.ru/report/bylink/summary/909?v=1&c=0&userId=10394699&validationHash=6F10F760E0C45DD03B125B2983107EF5960A791E>

---

## RESEARCH ON THE INTEGRATION OF AI AGENTS INTO A DYNAMIC WAF MODEL FOR ADAPTIVE PROTECTION OF WEB APPLICATIONS

---

*Khomutinnikov Maxim*

*Lecturer at PACE University in the Department of Computer Science  
New York, USA*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЦИИ АГЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДИНАМИЧЕСКУЮ WAF-МОДЕЛЬ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

*Хомутильников Максим Евгеньевич*

*Преподаватель Университета ПЕЙС на факультете компьютерных наук  
Нью-Йорк, США*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.129.2196

### АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена внедрению агентов искусственного интеллекта в динамический веб-брандмауэр для повышения адаптивности защиты приложений. Актуальность рассматриваемой в исследовании темы показана в связи с возрастающей сложностью атак и ограничениями сигнатурных методов. Новизна работы заключается в рассмотрении статистического профилирования, анализа аномалий, имитационного обучения и генерации синтетического трафика в единой архитектуре WAF. Подробно описан механизм формирования профиля поведения пользователя на основе входящих запросов и ответов сервера, а также схема блокировки отклонений от обычной модели трафика. Особое внимание уделяется обучению с подкреплением, которое позволяет агенту различать логически значимые и бессмысленные действия. Целенаправленный обзор эмпирических исследований показывает повышение точности обнаружения до 99% при минимальном количестве ложных срабатываний. Учитываются ограничения, включая потребность в вычислительных ресурсах, регулирование обработки персональных данных и угрозы враждебных атак. Предложены рекомендации по внедрению: поэтапный переход от режима мониторинга к активной блокировке, интеграция WAF с процессами DevSecOps и периодическая переоценка обучающих выборок специалистами по безопасности. Представленные выводы подтверждены экспериментальным анализом общедоступных подробных наборов запросов. Эта статья будет полезна специалистам по безопасности.

### ABSTRACT

This article is devoted to the implementation of artificial intelligence agents in a dynamic web firewall to increase the adaptability of application protection. The relevance of the topic considered in the study is shown due to the increasing complexity of attacks and the limitations of signature techniques. The novelty of the work lies in the consideration of statistical profiling, anomaly analysis, simulation training and synthetic traffic generation in a single WAF architecture. The mechanism for forming a user behavior profile based on incoming requests and server responses, as well as a scheme for blocking deviations from the normal traffic model, is described in detail. Special attention is paid to reinforcement learning, which allows the agent to distinguish between logically meaningful and meaningless actions. A focused review of empirical studies shows an increase in detection

accuracy of up to 99% with minimal false positives. Limitations are considered, including the need for computing resources, regulation of personal data processing, and threats of adversarial attacks. Recommendations for implementation are proposed: a phased transition from monitoring mode to active blocking, integration of WAF with DevSecOps processes, and periodic reassessment of training samples by security specialists. The presented conclusions are confirmed by an experimental analysis of public detailed query sets. This article will be useful for security experts.

**Ключевые слова:** брандмауэр веб-приложений, машинное обучение, аномалия, имитационное обучение, поведенческий анализ, адаптивная защита, искусственный трафик, SQL-инъекция, API, облачная безопасность.

**Keywords:** Web Application Firewall, machine learning, anomaly, simulation learning, behavioral analysis, adaptive protection, synthetic traffic, SQL injection, API, cloud security.

### **Introduction**

Automated, AI-driven attacks have pushed traditional signature-based WAFs beyond their effective limits: adversaries cloak malicious requests as legitimate traffic, exploiting the predictability of rule sets. Incorporating machine learning enables a firewall to update its models in real time based on observed traffic, learn patterns of normal behavior, identify atypical deviations, and block them. By simulating valid user activity within a permissible variance, this approach reduces false positives while maintaining sensitivity to genuine threats.

The objective of this paper is to examine the architecture and methodology for integrating AI agents into a dynamic WAF model that delivers adaptive protection for web applications. To fulfill this objective, the following tasks are defined:

1. Describe the mechanism for building a user behavior model from the system's input and output data.
2. Demonstrate how threats are detected and blocked when behavior deviates from established norms.
3. Investigate the use of artificial intelligence techniques to train the WAF model by emulating safe user behavior across various scenarios.
4. Assess the approach's effectiveness and limitations based on a review of current research and experimental results.

### **Methods and Materials**

The theoretical foundation encompasses the following publications: D. E. Vilkhovsky [1]

investigated the application of AI for detecting SQL injections, XSS, and CSRF. Source [4] presented a survey of emerging protection technologies and proposed a prototype WAF architecture with automated learning. D. Molteni [2] described Cloudflare's corporate framework for protective models. H. A. Roman-Gallego [3] evaluated the performance of supervised learning classifiers on 100,000 requests. S. Toprak [5] implemented a deep neural network for anomaly analysis. S. Torrano-Jimenez [6] formulated an XML-based approach to a positive security policy. Source [7] provided an industrial overview of User Behavior Analytics modules. S. Wang [8] developed an offline imitation learning method for analyzing sequences of user actions.

For the preparation of this article, the comparative method, structural analysis of journalistic and academic sources, synthesis of empirical data, statistical processing of traffic datasets, experimental attack modeling, and reinforcement learning of agent models were employed. This blend of methodologies made it possible to juxtapose laboratory trial outcomes with industry reports, thereby identifying conditions that improve detection accuracy while reducing false alarms.

### **Results**

Traditional WAFs rely on attack signatures—sets of request patterns for known threats (SQL injections, XSS, etc.). However, this static approach is vulnerable: if an attacker alters the malicious payload so that it no longer matches any known signature, the WAF will allow it through [3] (Figure 1).

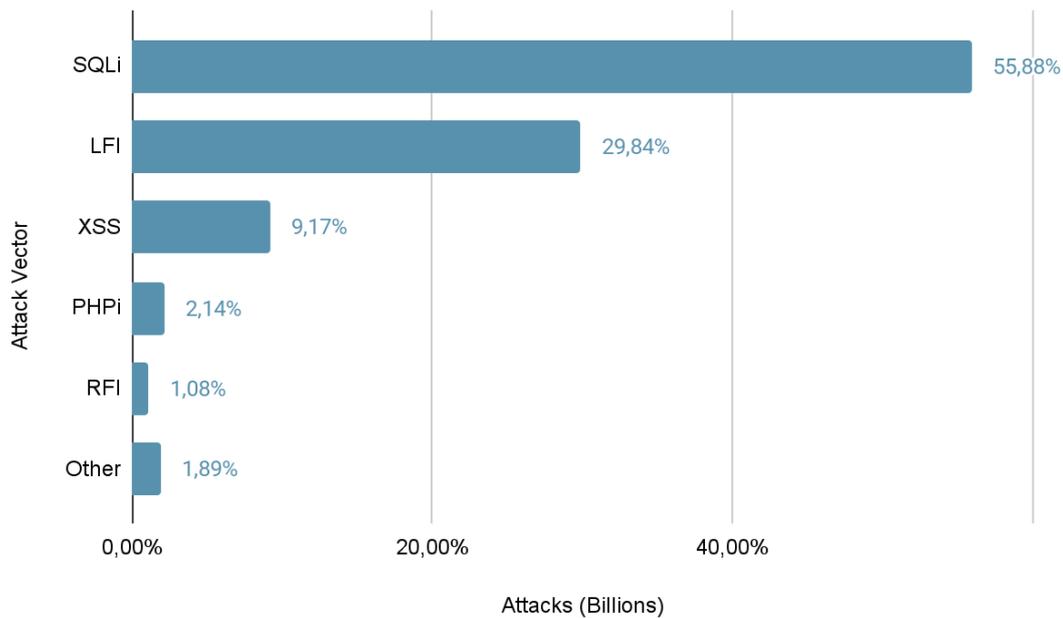


Figure 1. Main attack vectors (compiled by the author based on [3])

In an AI-integrated dynamic WAF, a trained model replaces fixed rules. This model learns from the typical (normal) traffic of a specific web application, employing machine learning techniques to analyze a variety of request parameters: sequences of URLs and API calls, transmitted parameter sets, data sizes and structures, session behaviors, and more.

The literature describes several approaches to building such models [6]. One classic method is training on a statistical request profile: the system collects data on how requests and responses ordinarily appear—e.g., which HTTP methods are used, parameter value ranges, frequency of access to particular resources, and so on. A request that deviates substantially in length or parameter structure from these norms is flagged as anomalous. Torrano-Gimenez et al. proposed storing the description of normal behavior in an XML file containing rules for various request aspects: allowed HTTP methods, headers and their values, valid parameters and ranges for each web resource, etc. [6]. After initial training on real traffic from the target application, a reference profile is established; thereafter, each incoming request is compared against this model. Any deviation exceeding a predefined threshold is treated as suspicious and may be classified as an attack. This approach embodies a positive security model: anything not explicitly permitted by the normal-behavior model is blocked. Experimental evaluations of such systems demonstrate high effectiveness: after sufficient training, they achieve high detection rates with low false-positive rates [6].

Specifically, the XML-profile-based WAF demonstrated “a very high attack detection rate with a very low false-alarm rate” following proper model configuration [6]. Other techniques include probabilistic models—such as Markov chains for request sequences. By learning transitions between pages and user actions, the WAF constructs a

probabilistic model of a “normal” session [6]. If a user’s sequence of actions deviates markedly from this model (for example, an unexpected navigation or repeated suspicious requests), the session is flagged as anomalous.

Analysts apply clustering algorithms alongside multivariate statistical techniques to identify outliers. Crucial data sources include not only incoming requests but also the system’s outputs—namely, the web application’s responses. Going forward, a WAF may incorporate response status codes (200, 404, 500, etc.) and error-page contents: if a series of requests generates an unusually high number of unexpected errors (for example, 500 Internal Server Error), this may indicate attempts to exploit vulnerabilities. Contemporary research advocates constructing models that treat “input–output” jointly: for instance, a request that triggers unplanned application behavior (up to a crash or exception), even if it appears legitimate, is deemed anomalous [1]. In this way, AI agents monitor client–server interaction patterns holistically, learning which sequences of requests and responses characterize normal user activity.

On the basis of the established normal-behavior model, the dynamic WAF shifts to anomaly-driven attack detection. Unlike signature-based methods—which compare each request against a database of known attack patterns—this approach flags any request or session that deviates from the profile beyond an allowable variance as potentially malicious. For example, Roman-Gallego et al. [3] employed various classification algorithms (Naive Bayes, k-nearest neighbors, SVM, and linear regression) to determine a request’s maliciousness from multiple extracted features. Trained on a synthetic dataset of over 100 000 requests, these algorithms achieved classification accuracies ranging from 92 % to 99 % [3]. Thus, AI-based methods can cover typical web-attack vectors (such as diverse SQL injections) without explicit rule

programming—the model autonomously “learns” the distinguishing characteristics of malicious payloads. Blocking decisions in a dynamic WAF may occur at different levels: at the request level (an individual suspicious HTTP request is immediately rejected), at the session level (anomalous user behavior leads to session termination or further verification, such as a CAPTCHA), or at the IP-address level (the WAF temporarily blocks all traffic from an address after detecting multiple deviations—akin to an IPS). A key advantage of this approach is its ability to detect previously unknown attacks—those for which no signatures exist.

Of course, one of the inherent risks of an anomaly-based approach is the occurrence of false positives—instances in which a legitimate user action, albeit unusual, is blocked. To mitigate such cases, sensitivity thresholds are configured and an allowable deviation corridor (tolerance range) is defined, within which behavior remains acceptable. Some contemporary WAF solutions employ a hybrid strategy: a signature filter first eliminates definitively known attacks (quickly and with zero false positives), and then an AI module analyzes the residual traffic for anomalies. This combination eases the burden on machine-learning algorithms and improves overall detection accuracy [2].

A defining characteristic of AI-agent integration is continuous learning, including simulation-based training on safe scenarios. The aim is for the WAF to move beyond a static “normal vs. anomalous” dichotomy and to predict which deviations represent permissible variations of genuine user behavior. Several techniques facilitate this: synthetic safe-traffic generation, user-imitation modeling, and reinforcement or imitation learning. In synthetic-data generation, AI

agents draw on the baseline normal-behavior model to produce numerous artificial requests that are statistically akin to real traffic yet varied in content.

Wang et al. [8] introduce the OIL-AD framework (Offline Imitation Learning for Anomaly Detection), which applies offline imitation learning to historic normal trajectories and then flags anomalies as deviations from the agent’s learned decisions. Within a WAF, this entails training an agent-policy to mimic real user behavior and, during operation, comparing incoming user actions against the policy’s expected optimal actions. If a user’s sequence of requests serves no coherent purpose—and thus would not be chosen by the normal-behavior agent—it is flagged as potentially malicious.

The permissible deviation in this context can be expressed as an allowable drop in action optimality: real users occasionally act suboptimally (for example, making extra clicks or errors), so the system should ignore minor deviations from the ideal path and only react to systematic, significant divergences. Through training, AI agents can model such human imperfections—random delays, misclicks, and so forth—thereby teaching the WAF to tolerate “human” anomalies while remaining sensitive to machine-driven attacks.

Studies and practical deployments have demonstrated that AI-driven WAFs significantly enhance the security of web applications. Cloudflare, an industry leader, reports employing AI for adaptive protection—covering API-traffic anomaly detection and client-specific defense customization [2]. This evidence underscores the real-world applicability of the approaches described. Nevertheless, certain limitations remain (Table 1).

Table 1.

**Limitations when using AI for adaptive protection (compiled by the author based on [2])**

Limitation	Description
Training complexity	A large volume of normal-traffic data is required to avoid high rates of false positives or missed attacks. When an application is new or its user base is small, assembling a representative dataset is challenging.
Resource intensity	Machine-learning algorithms—especially deep neural networks—demand substantial computational resources and careful optimization to operate in real time on high-velocity web request streams. Under heavy load (hundreds of requests per second), the system may encounter performance bottlenecks.
Adversarial adaptation	Attackers can also leverage AI to craft malicious requests that deliberately conform to the learned normal profile (so-called adversarial attacks against the model).
Interpretability	The rationale behind AI-model decisions is not always transparent to administrators. When a WAF blocks traffic citing an “anomaly,” it is helpful to indicate which metric exceeded its threshold (for example, “the ‘id’ parameter was significantly longer than usual”). Developers address this by incorporating explanation modules or logging detailed blocking reasons.

An essential organizational consideration is the configuration and ongoing support of an AI-WAF. Skilled professionals—security analysts and data engineers—must oversee the training process and periodically review and update models so they do not

degrade over time (for example, as user behavior evolves).

The economic costs of maintaining an AI agent vary depending on the scale of HTTP traffic. For organizations with a limited number of monthly

requests, expenses for dedicated compute resources remain moderate: a server without GPU acceleration and a minimal amount of RAM are sufficient. In large enterprises—where request volumes are measured in the millions—the need arises for graphics processors or distributed clusters, leading to substantial costs for renting cloud instances and supporting the machine-learning pipeline.

### Discussion

Integration of AI agents into a WAF signifies a qualitative shift from a static, reactive model to dynamic, proactive protection. The analysis demonstrates that machine learning and behavioral analysis algorithms address a triad of objectives (Figure 2):

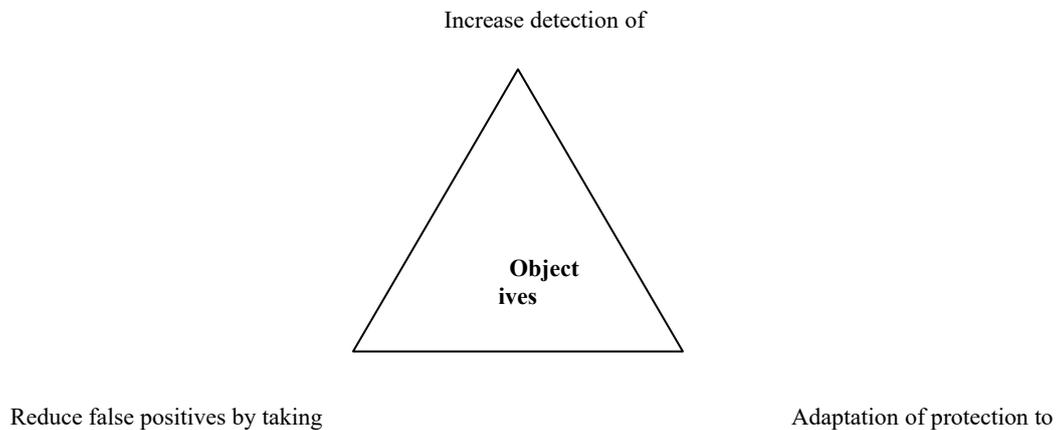


Figure 2. Tasks solved using machine learning and behavioral analysis algorithms (compiled by the author based on [4])

The mechanism for generating a behavior model from input/output data effectively creates a unique security profile for each web application. Whereas a classic WAF enforces a universal rule set—identical for all applications (for example, disallowing `<script>` in parameters or `UNION SELECT` in SQL queries)—an AI-WAF derives rules specific to a given application: one site may permit long text parameters (such as a forum or blog), while another may not (a concise API). This tailored profiling enhances accuracy by reducing the risk of blocking traffic that is normal for that application and by better detecting aberrant requests. However, it also entails more complex configuration—a turnkey product may require on-premises training by the client.

Blocking threats based on deviations is not a new concept (anomaly-based IDS have existed for years), but with AI it reaches a new level: deep neural networks can discern complex, multifactor deviations that are hard to encode by hand. For instance, slight anomalies across ten parameters might escape human detection, yet an AI classifier aggregates these subtle signals to render an “attack” verdict. In this role, an AI-WAF serves as a second filtration layer—highly sensitive and intelligent. There is, however, a danger that an overzealous AI could block legitimate traffic. Therefore, many AI-WAF deployments initially run in a monitoring-only mode (“detected-only”), gathering statistics without blocking, and only switch to prevention (blocking) after manual validation.

Imitation-based training on safe behavior represents the most innovative—and still experimental—component. While statistical methods and even basic machine-learning techniques (such as

the SVM implementation in Roman-Gallego et al., 2023) have reached a high level of maturity, applying imitation learning and reinforcement learning to WAFs remains at the research frontier [8]. The OIL-AD framework described in the literature—designed to learn from sequences of agent decisions—offers significant promise: it aligns user-action analysis more closely with how a human security analyst would judge action coherence [8]. However, real-world deployment demands caution: a reinforcement-learning (RL) agent may err if the environment is incompletely specified, or if an attacker deliberately crafts a sequence of actions that appear “almost logical.” Nonetheless, even preliminary implementations of User Behavior Analytics (UBA) yield tangible benefits, especially in combating fraud and account takeovers. For example, incorporating behavioral biometrics—typing speed, mouse-movement patterns, and so forth—offers an additional dimension that could be integrated into an AI-WAF to strengthen authentication and detect automated bots.

When considering limitations, it must be acknowledged that the human factor remains indispensable. AI agents are designed to augment the security administrator, not replace them. Upon detecting an anomaly, the system can escalate the event to a human analyst or to a more resource-intensive detector. Moreover, model training typically occurs under expert supervision (semi-supervised): specialists label false positives as normal, prompting model refinement, or include overlooked attacks in subsequent training as “malicious” examples. Ideally, as the dataset grows, the need for manual intervention steadily decreases.

Compatibility and integration present further challenges. Organizations already maintain monitoring infrastructures, SIEM platforms, and DevOps pipelines. An AI-WAF must fit seamlessly into that ecosystem, generate actionable alerts, and support granular configuration. A clear trend has emerged: major providers (for example, AWS) embed ML models directly within familiar interfaces—offering priority-based rules and sensitivity settings—while smaller vendors combine off-the-shelf ML libraries (for anomaly detection) with established open-source WAFs such as ModSecurity.

### Conclusion

The incorporation of AI agents into a dynamic WAF enhances adaptive protection through behavioral analysis and machine learning. Models are trained on incoming requests and responses, establishing a positive security model in which any statistically significant deviation is treated as an attack.

Threats unknown to the original signature set are identified by anomalous feature combinations, while synthetic-traffic generation during imitation learning reduces false positives. Deployment requires full-scale logging, a phased transition from monitoring mode, integration with DevSecOps processes, training staff to interpret AI outputs, and dedicated resources for ML analysis. Future research directions include resilience against adversarial attacks, federated learning, business-logic inspection, and a unified AI platform alongside IDS and anti-fraud systems.

The next phase will investigate schemes for optimizing AI-agent expenses: dynamic scaling of compute resources according to peak loads, use of lightweight models for preliminary analysis, and offloading part of the processing to edge nodes. This approach will allow the analytics layer to remain active only when certain load thresholds are reached, thereby reducing the time-based costs of running the infrastructure.

An open question remains the cost-benefit ratio of a phased rollout: it will be necessary to compare total expenditures on infrastructure and model training against the savings achieved by preventing attacks and minimizing application downtime. Further study of this topic should yield practical recommendations for

establishing AI-agent usage thresholds based on web-traffic levels and an organization's budget.

### References

1. Vilkhovskiy D. E. The possibilities of AI in the field of cybersecurity: issues of detection, prevention and response to SQL injections, XSS and CSRF attacks // *Modeling, systems and machines*. – 2024. – № 4 (72). – Pp. 111-124. – Text : electronic. – (accessed: 05/13/2025).
2. Molteni D., Cosgrove J., Kumar A., Aggarwal A. Defensive AI: Cloudflare's Framework for Defending Against Next-Gen Threats // *Cloudflare Blog*. – 2024. – Text: electronic. – (date of request: 05/18/2025).
3. Román-Gallego J. A., Pérez-Delgado M. L., Luengo Viñuela M., Vega-Hernández M. C. Artificial Intelligence Web Application Firewall for Advanced Detection of Web Injection Attacks // *Expert Systems*. – 2023. – Vol. 42, No. 1. – DOI: 10.1111/exsy.13505. – Text : electronic. – (accessed: 05/19/2025).
4. Tekerek A., Bay O. Design and implementation of an artificial intelligence-based web application firewall model // *Neural Network World*. – 2019. – Vol. 29. – P. 189-206. – DOI: 10.14311/NNW.2019.29.013. – Text: electronic. – (date of request: 05/15/2025).
5. Toprak S., Yavuz A. Web Application Firewall Based on Anomaly Detection using Deep Learning // *Acta Infologica*. – 2022. – pp. 15-25. – DOI: 10.26650/acin.1039042. – Text : electronic. – (accessed: 05/14/2025).
6. Torrano-Gimenez C., Pérez-Villegas A., Alvarez G. An Anomaly-Based Web Application Firewall // *In Proceedings of the International Conference on Security and Cryptography*. – 2009. – P. 23-28. – DOI: 10.5220/0002218900230028. – Text : electronic. – (date of request: 05/15/2025).
7. Discover the Threats WAF & MFA Miss – Real User Behavior Protection // *CrossClassify*. – 2025. – Text : electronic. – (date of access: 05/17/2025).
8. Wang C., Erfani S., Alpcan T., Leckie C. OIL-AD: An Anomaly Detection Framework for Sequential Decision Sequences // *arXiv preprint arXiv:2402.04567*. – 2024. – Text: electronic. – (date of request: 05/16/2025).

---

**PERFORMANCE OF DIGITAL MODULATION SIGNALS  
OVER COMMUNICATION SYSTEMS**

---

*Trung Thanh Nguyen*

*Ph-D, Le Quy Don Technical University,  
Vietnam*

**SUMMARY**

This paper investigates the performance of key digital modulation schemes such as BPSK, QPSK, and M-QAM over communication channels modeled as AWGN, Rayleigh and Rician fading. The analysis focuses on bit error rate (BER) as a function of signal-to-noise ratio (SNR), supported by theoretical expressions and simulations. Results show that higher-order modulations offer greater spectral efficiency but are more vulnerable to channel impairments, while lower-order schemes provide better reliability under fading. The study highlights the necessity of adaptive modulation to balance efficiency and robustness in dynamic wireless environments, with relevance to 5G and IoT systems.

**Keywords:** digital modulation techniques, communication system, bit error rate, MATLAB environment.

**1. Introduction**

In modern communication systems, digital modulation techniques serve as the foundation for transmitting information efficiently over various types of channels [1-2]. The increasing demand for high-speed information transfer, robust connectivity, and efficient spectrum utilization necessitates the careful selection and analysis of modulation schemes under realistic channel conditions [3-4]. Understanding the behavior and performance of digital modulation schemes over communication environments—ranging from ideal additive white Gaussian noise (AWGN) channels to complex multipath fading channels such as Rayleigh and Rician—is essential for the optimal design and deployment of modern communication systems.

Digital modulation involves mapping digital information onto analog carrier signals by varying parameters such as amplitude, phase, or frequency. Commonly used schemes include Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), M-ary Phase Shift Keying (M-PSK), and M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) [5-6]. Each of these schemes offers different trade-offs between spectral efficiency, power efficiency, and bit error rate (BER) performance. These trade-offs become especially pronounced under non-ideal conditions introduced by wireless channels [7-8].

Wireless channels are inherently time-varying and often exhibit complex propagation phenomena such as multipath fading, Doppler shifts, shadowing, and interference. These effects significantly distort the transmitted signal, resulting in increased error probabilities. For performance analysis, two major channel models are considered:

- **AWGN Channel:** A baseline model where the only impairment is additive noise with a constant power spectral density. It provides a useful theoretical benchmark for evaluating modulation schemes.
- **Fading Channels:** More realistic models like Rayleigh and Rician channels that simulate signal attenuation due to multipath propagation. These models introduce random amplitude variations and phase shifts, mimicking real-world wireless environments [9-10].

The primary performance metric used in this study is bit error rate (BER), which quantifies the likelihood of bit errors occurring during transmission. BER is typically expressed as a function of the energy per bit to noise power spectral density ratio. This paper aims to provide a comprehensive analysis of the performance of various digital modulation techniques under both AWGN and fading channel conditions. Through theoretical derivations, mathematical modeling, and simulation-based evaluation, the objective is to:

- Compare the BER vs. characteristics for different modulation schemes.
- Evaluate the robustness of each scheme under Rayleigh and AWGN channels.
- Analyze the trade-offs between spectral efficiency and power efficiency.
- Determine the optimal modulation scheme for different SNR and fading environments.

The findings from this study will offer valuable insights for the design and optimization of wireless systems, particularly in the context of 4G/5G networks, IoT communications, and satellite links, where channel conditions vary dynamically and the modulation strategy must be adaptive. Section 2 presents the theoretical descriptions of AWGN and fading models. Section 3 shows the simulation results, and Section 4 summarizes the main conclusions.

**2. Simulation Models**

To evaluate the performance of digital modulation schemes over communication channels, a simulation framework is developed using MATLAB environments. The simulation models are designed to compare bit error rate (BER) performance as a function of SNR for different modulation techniques under AWGN, Rayleigh and Rician fading channel conditions. The complete simulation model for performance simulation over communication channel is shown in Fig. 1. The figure is illustrated as a coherent communication system model.

In this paper, the following digital modulation techniques are implemented:

- Binary phase shift keying (BPSK)
- Quadratic phase shift keying (QPSK)
- 8, 16, 32 phase shift keying (M-PSK).

Each modulation technique maps binary input data to complex symbols according to standard constellation definitions. The

modulator and demodulator functions are implemented in the MATLAB environment.

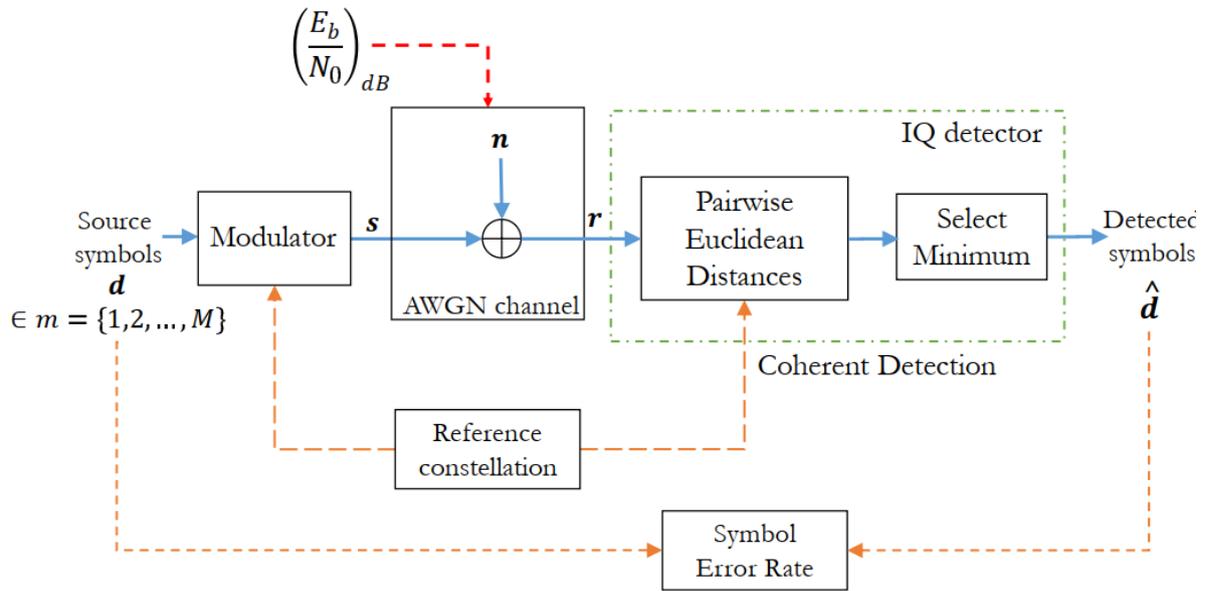


Fig. 1 Simulation diagram of evaluating performance of digital modulation schemes.

**2.1 Channel Models**

In this paper, three types of communication channels are modeled:

**a) AWGN Channel**

The AWGN model adds white Gaussian noise with zero mean and variance  $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$  to transmitted signals. The SNR is varied in ranges [0, 20] dB in 1 dB step to observe BER performance.

$$r(t) = s(t) + n(t) \tag{1}$$

Where  $r(t)$ ,  $s(t)$  are the received and transmitted signals, and  $n(t)$  is AWGN.

**b) Rayleigh Fading Channel**

Rayleigh fading channel is modeled as a multiplicative distortion applied to the transmitted signal:

$$r(t) = h(t) \times s(t) + n(t) \tag{2}$$

where  $h(t)$  is the complex Gaussian random variable with zero mean and unit variance.

**c) Rician Fading Channel**

The Rician fading channel models a communication scenario where the received signal consists of:

-Dominant Line of Sight (LOS) path

-Multiple Non-line of Sight (NLOS) reflected/scattered components.

The received signal in a Rician fading channel can be modeled as:

$$r(t) = h(t) \times s(t) + n(t) \tag{3}$$

where is the Rician fading coefficient, which is defined as follows:

$$h(t) = h_{LOS} + h_{NLOS} \tag{4}$$

$h(t)$  is the function of K, where K is the Rician K-factor. The K-factor defines the ratio of power in the LOS path to the power in the scattered paths:

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \tag{5}$$

where A is the amplitude of the LOS component and  $\sigma^2$  is the variance of each quadrature Gaussian component.

**2.2 Performance Metric**

The primary performance metric is bit error rate (BER), which is computed as:

$$BER = \frac{\text{Number of error bits}}{\text{Total transmitted bits}}$$

The theoretical BER expressions for AWGN, Rayleigh and Rician channels are used for comparison with simulated results to validate the accuracy of the models.

**3. Simulation results**

This section analyzes the above-mentioned digital modulation techniques in a MATLAB environment with different types of communication channels such as: AWGN, Rayleigh and Rician fading, in the range of SNR from -10 dBm to 25 dBm. The simulation parameters are shown in Table 1.

Table 1.

Simulation parameters	
Parameter	Value
Number of bits	1e6
SNR range	-10 to 25 dB (step: 2 dB)
Channel models	AWGN, Rayleigh and Rician
Modulation techniques	M-PSK
Fading type	Flat fading
Doppler frequency	30 Hz
Detection technique	Coherent demodulation
Noise variance	Computed per SNR

#### a) AWGN channel

The graph illustrates the symbol error rate (SER) performance of various M-ary Phase Shift Keying (M-PSK) modulation schemes—including BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, and 32-PSK—plotted against SNR (dB). As expected, the symbol error rate decreases with increasing SNR, but the rate of improvement varies significantly across modulation orders.

Lower-order modulations such as BPSK and QPSK exhibit superior error performance at low-to-moderate SNRs. For instance, BPSK achieves a symbol error rate below  $(10^{-5})$  at around SNR = 9 dB, while QPSK reaches a similar performance near SNR = 11 dB. In contrast, higher-order modulations such as

16-PSK and 32-PSK require significantly higher SNR values to achieve comparable SER. Notably, 32-PSK maintains a high symbol error rate (above  $(10^{-2})$ ) until approximately SNR = 16 dB and only approaches beyond SNR = 22 dB.

This behavior confirms the classic trade-off in digital modulation design: higher-order schemes provide greater spectral efficiency but are more susceptible to noise and require higher SNR for reliable transmission. The graph clearly demonstrates that, under AWGN conditions, the complexity and performance of PSK systems must be balanced according to the communication system's SNR environment and error tolerance.

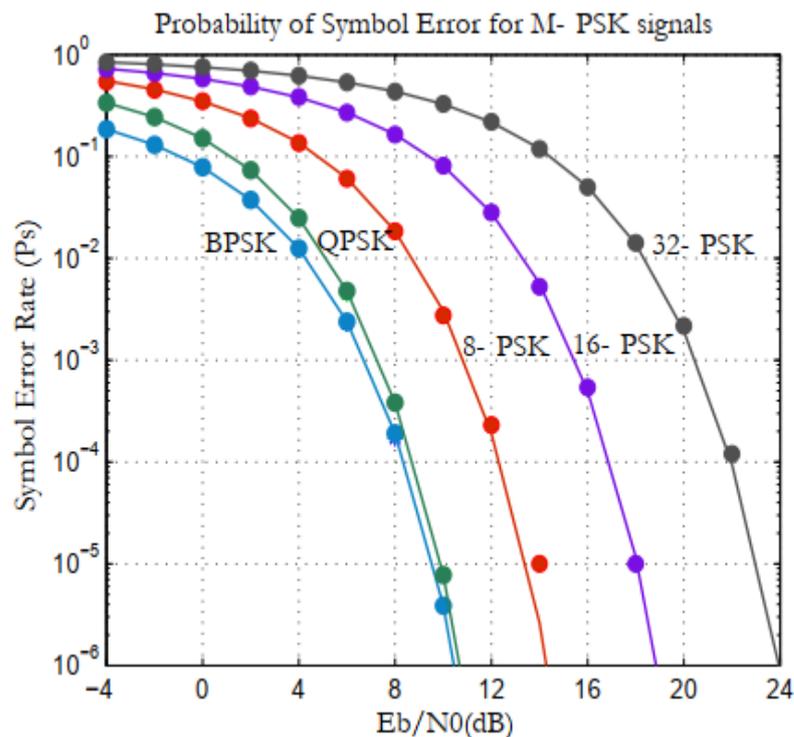


Fig. 1 Probability of symbol error for M-PSK signals over AWGN channel.

b) Rayleigh fading channel

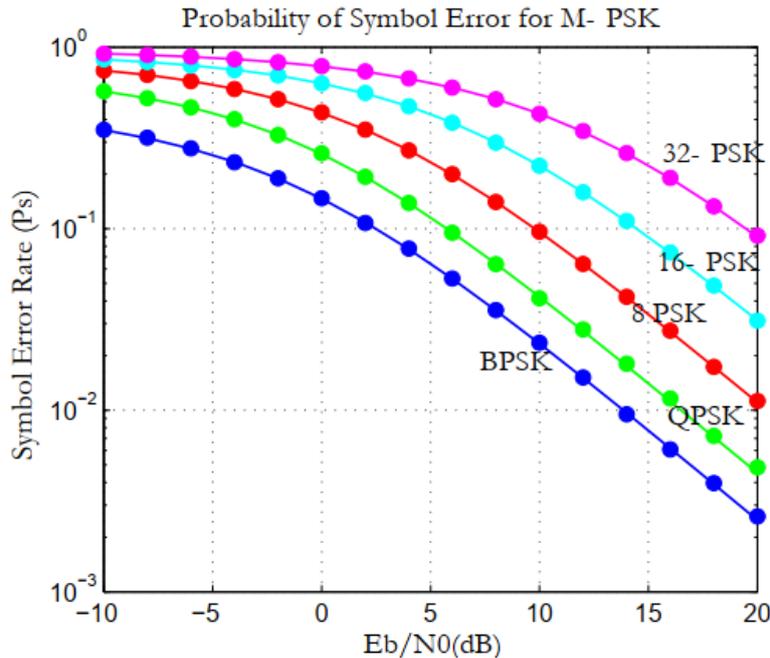


Fig. 2 Probability of symbol error for M-PSK signals over Rayleigh fading channel.

The graph displays the probability of symbol error (SER) versus SNR (in dB) for various M-ary Phase Shift Keying (M-PSK) modulation schemes: BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, and 32-PSK. The results clearly show the expected trend where the symbol error rate decreases as the signal-to-noise ratio increases. However, performance degradation is more significant for higher-order modulation schemes.

At a given SNR, lower-order schemes such as BPSK and QPSK demonstrate significantly lower symbol error rates, making them more suitable for noisy or fading environments. For example, BPSK achieves SER < ) at approximately SNR =5 dB, while 32-PSK does not reach that level of performance even at SNR = 20 dB. This indicates that BPSK and QPSK are more robust against noise, whereas 32-PSK, though spectrally efficient, is more sensitive to noise and thus

requires a much higher SNR for acceptable performance.

In summary, this plot illustrates the trade-off between spectral efficiency and error performance in M-PSK systems. The choice of modulation should consider the operating SNR: lower-order M-PSK is preferable in low-SNR environments, while higher-order M-PSK may be leveraged in high-SNR conditions where bandwidth efficiency is prioritized.

c) Rician fading channel

The graph shows the symbol error probability SER versus SNR (dB) for 4-PSK (QPSK) modulation under Rician fading channels with different K-factors: 3 dB, 5 dB, 10 dB, and 20 dB. The K-factor represents the ratio of the power in the line-of-sight (LOS) path to the power in the scattered (non-LOS) paths.

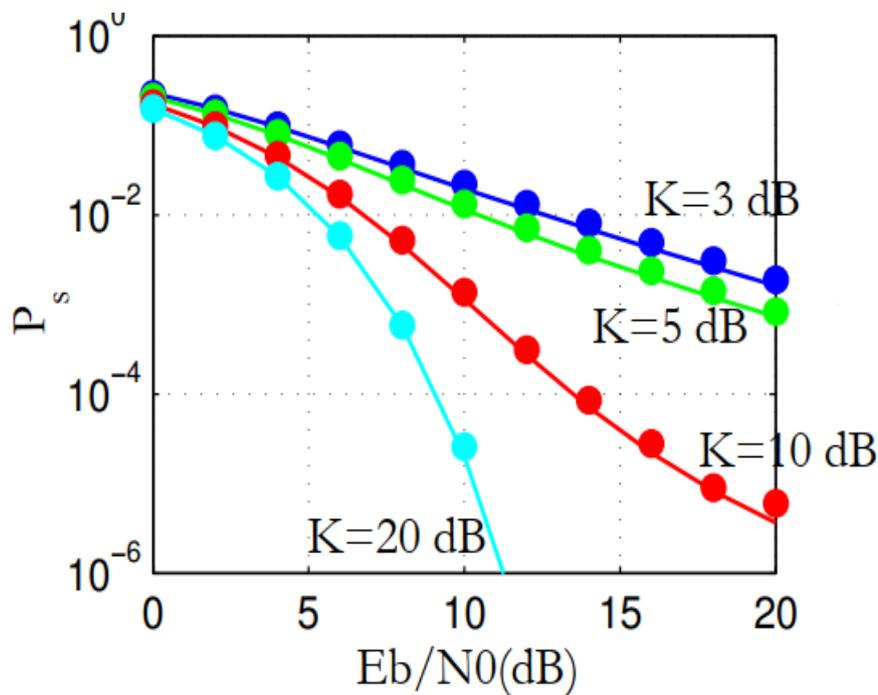


Fig. 4 Performance of modulations over Rician flat fading channel with different K-factors.

From the graph, we observe that as the K-factor increases, the symbol error rate significantly improves at a given SNR. For instance, at SNR = 10 dB, the SER for K=3 dB is around  $10^{-2}$ , while for K=20 dB, it drops below  $10^{-5}$ . This trend highlights that the presence of a strong LOS component (larger K) enhances the reliability of the signal and reduces the impact of multipath fading.

In contrast, lower K-factor values, which represent environments with weaker LOS components or rich scattering (e.g., indoor or urban scenarios), show worse performance due to increased channel randomness and fading severity.

Overall, this plot clearly demonstrates that 4-PSK modulation benefits significantly from higher K-factor Rician channels, and performance approaches that of AWGN as  $K \rightarrow \infty$ . This makes 4-PSK suitable for environments where a strong LOS component can be maintained, such as in rural or fixed wireless access systems.

#### 4 Conclusion.

This study has presented a comprehensive evaluation of the performance of key digital modulation schemes—namely BPSK, QPSK, and M-PSK over different communication channel models including AWGN, Rayleigh, and Rician fading environments. Through both theoretical BER analysis and simulation-based evaluation, the results have demonstrated that while higher-order modulation formats offer improved spectral efficiency, they are significantly more susceptible to channel impairments, especially in the presence of multipath fading.

The performance under AWGN channels serves as a theoretical benchmark, where modulation schemes operate close to their ideal BER curves. In contrast, fading channels introduce substantial degradation, with Rayleigh fading exhibiting the most severe impact due to the absence of a direct path. Rician fading,

incorporating a line-of-sight component, offers improved performance relative to Rayleigh, but still falls short of AWGN conditions, especially at low K-factor values.

These findings highlight the importance of adaptive modulation techniques and channel estimation in practical systems. For reliable communication over wireless channels, particularly in varying and unpredictable environments, modulation scheme selection must be dynamically optimized based on real-time channel state information.

Future work may explore the integration of error correction coding, diversity schemes, and MIMO configurations to further enhance performance under realistic channel conditions.

#### References

- [1] M. R. Bhatnagar, "Performance of M-QAM in DF cooperative systems over Rician fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 12, pp. 10125–10131, Dec. 2016.
- [2] T. P. Vu and D. S. Ha, "Performance analysis of digital modulation schemes under composite fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2578–2590, Apr. 2018.
- [3] J. Zhang, X. Wang, and Y. Liu, "BER performance of BPSK/QPSK under generalized fading conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11780–11788, 2019.
- [4] M. A. Kishk and M.-S. Alouini, "Adaptive modulation in Rician and Nakagami fading channels with channel estimation errors," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 1322–1325, Oct. 2019.
- [5] Y. Wei and H. Chen, "Performance comparison of digital modulation techniques in fading channels using simulation," in *Proc. IEEE International*

*Conference on Communication Systems (ICCS)*, Chengdu, China, 2020, pp. 410–414.

[6]A. J. Abidi, S. G. Harb, and M. S. Khan, “BER analysis of coherent and non-coherent modulation schemes in wireless fading channels,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 167482–167491, 2020.

[7]R. Kumar and S. Yadav, “Comparative performance analysis of digital modulation schemes over Rayleigh and Rician fading using MATLAB,” in *Proc. IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, Greater Noida, India, 2021, pp. 993–997.

[8]A. M. Farhan et al., “BER evaluation of M-ary QAM under various fading models in 5G channels,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 139404–139412, 2021.

[9]S. Ahmed and A. Qamar, “Performance study of BPSK and QPSK over wireless channels using machine learning-based prediction,” in *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 1–6.

[10]P. R. Thakur and M. S. Yadav, “Optimizing adaptive modulation over fading channels in IoT-enabled networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 2345–2355, Mar. 2025. (Early access, DOI:10.1109/JIOT.2025.0000000)

# Евразийский Союз Ученых.

## Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 4 (129)/2025 Том 1

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

**Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

**Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.