

УДК 004.738.5

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (физико-математические науки, экономические науки)

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЦИЕЙ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ И STARLINK ДЛЯ БЕСШОВНОГО ИНТЕРНЕТ-СОЕДИНЕНИЯ**

Мирошниченко Максим Евгеньевич  
Студент

[Mystdwyse@yandex.ru](mailto:Mystdwyse@yandex.ru)

*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия, Краснодар 350044, Калинина 13*

Актуальность исследования обусловлена насущной потребностью в обеспечении повсеместного и бесперебойного беспроводного интернет-доступа, в то время как существующие технологии, такие как сети пятого поколения и низкоорбитальные спутниковые системы, имеют индивидуальные ограничения, особенно критичные для обширных территорий и специфических задач, например, в агропромышленном комплексе. Данная статья направлена на теоретическое обоснование целесообразности и разработку концептуальных основ для дальнейших исследований по созданию системы интеллектуального управления интеграцией сетей пятого поколения и низкоорбитальной спутниковой системы Starlink для обеспечения бесшовного интернет-соединения. Ведущим подходом к исследованию послужил комплексный анализ научной литературы, сравнительный технологический анализ и методы теоретического моделирования для оценки потенциала интеграции под управлением искусственного интеллекта. В статье представлен сравнительный анализ характеристик сетей пятого поколения и Starlink, подтверждающий их комплементарность; разработаны концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления и обобщенный алгоритм её функционирования; а также обоснована необходимость применения методов искусственного интеллекта, включая обучение с подкреплением и функции полезности, для эффективной оркестровки ресурсов и обеспечения адаптивного выбора сети. Материалы статьи формируют теоретическую базу и выдвигают аргументированное предложение о проведении дальнейших научно-исследовательских работ, что имеет практическую ценность для создания адаптивных гибридных сетей, способствующих решению проблемы цифрового неравенства и обеспечивающих

UDC 004.738.5

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics (physical and mathematical sciences, economic sciences)

### **PROSPECTS FOR INTELLIGENT MANAGEMENT OF THE INTEGRATION OF FIFTH-GENERATION NETWORKS AND STARLINK FOR SEAMLESS INTERNET CONNECTIVITY**

Miroshnichenko Maxim Evgenievich  
Student

[Mystdwyse@yandex.ru](mailto:Mystdwyse@yandex.ru)

*"Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin", Russia, Krasnodar 350044, Kalinina 13*

The relevance of this research stems from the urgent need to ensure universal and uninterrupted wireless Internet access, while existing technologies, such as fifth-generation networks and low-orbit satellite systems, have individual limitations that are particularly critical for large territories and specific tasks, such as in the agro-industrial complex. This article aims to provide a theoretical justification for the feasibility and develop a conceptual framework for further research on the creation of an intelligent management system for the integration of fifth-generation networks and the Starlink low-orbit satellite system to ensure seamless Internet connectivity. The leading approach to the research was a comprehensive analysis of scientific literature, comparative technological analysis, and theoretical modeling methods to assess the potential of integration under the control of artificial intelligence. The article presents a comparative analysis of the characteristics of fifth-generation networks and Starlink, confirming their complementarity; develops a conceptual architecture for an intelligent control system and a generalized algorithm for its operation; and justifies the need to apply artificial intelligence methods, including reinforcement learning and utility functions, for effective resource orchestration and adaptive network selection. The materials of the article form a theoretical basis and put forward a reasoned proposal for further research, which has practical value for the creation of adaptive hybrid networks that contribute to solving the problem of digital inequality and provide a technological basis for the digitalization of key industries, including the introduction of precision farming technologies in agriculture

технологическую основу для цифровизации ключевых отраслей, включая внедрение технологий точного земледелия в сельском хозяйстве

Ключевые слова: 5G, STARLINK, НИЗКООРБИТАЛЬНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ГЕТЕРОГЕННЫЕ СЕТИ, ИНТЕГРАЦИЯ СЕТЕЙ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, БЕСШОВНОЕ ИНТЕРНЕТ-СОЕДИНЕНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ, КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ, ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ, ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ЦИФРОВИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Keywords: 5G, STARLINK, LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEMS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, MACHINE LEARNING, HETEROGENEOUS NETWORKS, NETWORK INTEGRATION, INTELLIGENT MANAGEMENT, SEAMLESS INTERNET CONNECTION, RESOURCE MANAGEMENT, CONCEPTUAL MODEL, THEORETICAL JUSTIFICATION, PRECISION AGRICULTURE, AGRICULTURAL INDUSTRY, DIGITALIZATION OF AGRICULTURE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-210-061>

## 1. Введение

Современное развитие информационно-коммуникационных технологий выдвигает на передний план задачу обеспечения повсеместного, высокоскоростного и бесперебойного беспроводного доступа к сети Интернет, что критически важно для функционирования Интернета вещей (IoT), интеллектуальных транспортных систем, беспилотных аппаратов и цифровизации различных отраслей, включая агропромышленный комплекс, где передовые концепции, такие как точное земледелие (Precision Agriculture), требуют надёжной и повсеместной связи для сбора данных с датчиков, управления беспилотной техникой и оперативного принятия решений на обширных сельскохозяйственных угодьях [1, 2]. Существующие технологии, такие как сети пятого поколения (5G) и низкоорбитальные спутниковые системы (LEO), включая Starlink, обладают значительным потенциалом, однако их раздельное применение сопряжено с имманентными ограничениями: 5G – в зоне покрытия и стоимости развёртывания, особенно на удалённых полях, характерных для сельского хозяйства, LEO-системы – в задержках и стабильности канала

<http://ej.kubagro.ru/2025/06/pdf/61.pdf>

при определённых условиях, что может быть критично для приложений точного земледелия, требующих реакции в реальном времени [1-4].

Перспективным направлением преодоления этих ограничений является синергетическая интеграция наземных сетей 5G и спутниковых LEO-систем. Такая гибридная архитектура способна обеспечить как высокую производительность 5G в зонах уверенного приёма, например, вблизи агропромышленных комплексов или населённых пунктов, так и глобальный охват Starlink для мониторинга и управления операциями на отдалённых сельскохозяйственных территориях. Однако эффективное управление столь сложной, гетерогенной и динамической инфраструктурой требует разработки новых подходов, где ключевую роль призваны сыграть методы искусственного интеллекта (ИИ) для адаптивной оркестровки сетевых ресурсов и обеспечения бесшовного переключения между сегментами. Анализ литературы [5-12] показывает, что, несмотря на активные исследования в области интеграции наземных и неземных сетей и применения ИИ в управлении сетями, комплексная концепция интеллектуального управления специфическим взаимодействием 5G и LEO-систем типа Starlink для обеспечения бесперебойного интернет-соединения, в том числе для нужд высокотехнологичного сельского хозяйства, остаётся недостаточно проработанной.

Объектом настоящего исследования выступают процессы интеграции и совместного функционирования сетей 5G и LEO-систем. Предметом является разработка концептуальных основ интеллектуального управления гибридной сетью 5G-Starlink. Основной целью работы является теоретическое обоснование целесообразности и формирование базиса для дальнейших исследований по созданию такой интеллектуальной системы управления. Для достижения цели поставлены следующие задачи: провести сравнительный анализ технологий 5G и Starlink; изучить проблемы их интеграции; исследовать потенциал ИИ для управления

гибридной сетью; разработать предварительную концептуальную архитектуру системы; определить метрики её эффективности; сформулировать предложение о дальнейших исследованиях. В статье последовательно рассматриваются методология, результаты теоретических построений, их обсуждение и итоговые выводы.

## **2. Методы**

### **2.1. Общая методология**

Методологическую основу настоящего обзорно-постановочного исследования составил комплексный подход, включающий аналитический обзор профильной научной литературы, сравнительный технологический анализ и элементы теоретического моделирования совместно с системным анализом для формирования и обоснования концептуальных предложений. Исходным этапом являлся систематический поиск и критическая оценка релевантных научных публикаций, охватывающих, в основном, период последних 5–7 лет, а также фундаментальных работ по теме исследования. Поиск проводился в ведущих международных и российских наукометрических базах данных, таких как IEEE Xplore, Scopus, Web of Science, ACM Digital Library и eLibrary.ru. В качестве поисковых запросов использовались комбинации ключевых терминов: “5G”, “Starlink”, “LEO satellite”, “Non-Terrestrial Networks (NTN)”, “AI in networking”, “machine learning for network management”, “heterogeneous networks”, “seamless handover” и “Quality of Service (QoS)”. Полученный информационный массив послужил базисом для последующего сравнительного анализа характеристик и ограничений сетей пятого поколения и низкоорбитальных спутниковых систем. Методы теоретического анализа и синтеза применялись для обобщения и систематизации данных, что позволило сформулировать концепцию интегрированной гибридной сети и определить ключевые предпосылки для применения искусственного интеллекта в задачах управления. Принципы системного подхода были

использованы при разработке предварительной концептуальной архитектуры предлагаемой интеллектуальной системы.

## 2.2. Формирование концепции и теоретические основы

Формирование концепции интеллектуального управления интеграцией сетей 5G и Starlink и обоснование перспективности данного направления базировалась на нескольких последовательных этапах теоретического анализа и проработки.

Первоначально, для обоснования необходимости интеграции, проводилось детальное моделирование и оценка характеристик каналов связи для каждого из сегментов предполагаемой гибридной сети. Для сетей 5G рассматривались модели распространения радиоволн, учитывающие специфику частотных диапазонов и влияние городской среды, согласно рекомендациям 3GPP TR 38.901 [13]. Для спутникового сегмента Starlink учитывались модели распространения сигнала в атмосфере, потери на трассе и влияние погодных условий, опираясь на исследования в области моделирования LEO-каналов [14]. Ключевыми аналитическими инструментами на данном этапе являлись: уравнение передачи Фрииса (1) для оценки энергетики радиолинии [15, 16]; расчёт отношения сигнал/интерференция+шум (SINR) (2) для определения качества принимаемого сигнала [17]; и формула Шеннона-Хартли (3) для оценки теоретического предела пропускной способности канала [18].

$$P_r = P_t * G_t * G_r * \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 * L. \#(1)$$

$$SINR = \frac{P_s}{(P_i + P_n)}. \#(2)$$

$$C = B * \log_2(1 + SINR). \#(3)$$

Далее, на основе выявленной комплементарности технологий и сложности задачи управления гетерогенной средой, исследовалась

целесообразность применения методов искусственного интеллекта. Выбор оптимального канала должен основываться на многокритериальной оптимизации, учитывающей динамические параметры сети и требования пользователя. Для формализации процесса принятия решения может быть использована многокритериальная функция полезности (Utility Function), агрегирующая различные параметры качества обслуживания (QoS) и другие релевантные факторы. Гипотетический вид такой функции  $U$  может быть представлен как взвешенная сумма показателей:

$$U = w_1 * C - w_2 * D - w_3 * Cost - w_4 * Energy, \#(4)$$

где  $C$  – пропускная способность,  $D$  – задержка,  $Cost$  – стоимость,  $Energy$  – энергопотребление, а  $w_i$  – весовые коэффициенты, отражающие приоритетность соответствующих параметров для пользователя или приложения. Задача ИИ-системы будет заключаться в максимизации данной функции полезности при выборе сети. В качестве альтернативных или дополняющих подходов к принятию решений в интеллектуальной системе управления рассматриваются методы обучения с подкреплением (RL). Например, алгоритм Q-Learning (5), являющийся model-free RL алгоритмом, позволяет агенту обучаться оптимальной стратегии (политике) выбора действий в дискретном пространстве состояний и действий на основе получаемого вознаграждения [8, 19]. Обновление Q-значения (ожидаемой суммарной награды) для пары «состояние-действие» ( $s, a$ ) происходит итеративно:

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha * \left[ r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right], \#(5)$$

где  $\alpha$  – скорость обучения (learning rate),  $r$  – немедленное вознаграждение, полученное после выполнения действия  $a$  в состоянии  $s$  и перехода в состояние  $s'$ ,  $\gamma$  – фактор дисконтирования будущих вознаграждений (discount factor), а  $\max_{a'} Q(s', a')$  – максимальное Q-значение для следующего состояния  $s'$ . Разработка интеллектуальных алгоритмов

хэндовера на основе RL, минимизирующих время переключения и потери пакетов, является одной из ключевых подзадач в этом направлении.

Завершающим этапом концептуальной проработки стало определение релевантного набора метрик производительности, необходимых для объективной оценки эффективности предлагаемых в будущем интеллектуальных решений. К таким метрикам были отнесены: средняя и пиковая пропускная способность, значения сквозной задержки и джиттера, вероятность разрыва соединения, коэффициент успешности хэндовера, процент покрытия территории с заданным уровнем QoS и показатели энергоэффективности пользовательских терминалов.

### **3. Результаты**

В рамках настоящего исследования, направленного на теоретическое обоснование перспективности интеграции сетей пятого поколения и низкоорбитальной спутниковой системы Starlink под управлением искусственного интеллекта, был проведён всесторонний анализ и разработаны концептуальные положения, формирующие информационную базу для выдвижения предложения о проведении дальнейших углублённых исследований.

#### **3.1. Анализ комплементарности технологий 5G и Starlink**

Систематизация и сравнительный анализ технических характеристик, преимуществ и ограничений сетей 5G и спутниковой системы Starlink применительно к задаче обеспечения бесперебойного интернет-соединения позволили выявить их выраженную комплементарность. Обобщённые данные этого анализа сведены в Таблицу 1.

Как следует из представленных данных, сети 5G, особенно при использовании миллиметрового диапазона, обеспечивают экстремально высокие скорости передачи данных и минимальные задержки, однако их развёртывание для сплошного покрытия обширных территорий сопряжено со значительными экономическими и инфраструктурными сложностями. В

то же время система Starlink, благодаря своей глобальной (или близкой к глобальной) зоне обслуживания, способна обеспечить связность в удалённых и труднодоступных регионах, где развёртывание 5G экономически нецелесообразно, хотя и с потенциально более высокой задержкой и меньшей пиковой пропускной способностью на пользователя по сравнению с 5G. Эта выявленная взаимодополняемость создаёт объективные предпосылки для достижения синергетического эффекта при их интеллектуально управляемом совместном использовании, позволяя нивелировать индивидуальные недостатки каждой из систем.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики сетей 5G и Starlink в контексте обеспечения покрытия и потенциал гибридной систем

Характеристика	Сети 5G (mmWave/sub-6GHz)	Starlink (LEO)	Потенциал гибридной системы под управлением ИИ
<b>Зона покрытия</b>	Локальная, ограничена радиусом действия БС; высокая плотность БС для mmWave	Глобальная/квазиглобальная (с учётом терминалов)	Расширение зон покрытия 5G за счёт Starlink в «белых пятнах»; Starlink как резервный канал
<b>Пропускная способность</b>	Очень высокая (до десятков Гбит/с)	Высокая (сотни Мбит/с на пользователя, потенциально Гбит/с на спутник)	Динамическое распределение нагрузки: 5G для высоконагруженных приложений в зоне покрытия, Starlink для базовой связности или менее требовательных приложений
<b>Задержка (Round-Trip Time)</b>	Очень низкая (единицы-десятки мс)	Низкая для LEO (25–70 мс, потенциально ниже)	ИИ-управляемый выбор сети для приложений, критичных к задержке (5G), и приложений, толерантных к большой задержке (Starlink)
<b>Мобильность</b>	Поддержка высокой мобильности с хэндовером между БС	Поддержка мобильных терминалов, хэндовер между спутниками и лучами	Разработка интеллектуальных алгоритмов бесшовного вертикального хэндовера между 5G и Starlink для непрерывного обслуживания пользователей
<b>Стоимость развёртывания</b>	Высокая для сплошного покрытия	Умеренная для глобального покрытия (затраты на спутники и наземные станции)	Оптимизация стоимости владения за счёт гибкого использования ресурсов обеих систем и избегания избыточного развёртывания дорогостоящей инфраструктуры 5G в зонах с низкой плотностью абонентов
<b>Надёжность и доступность</b>	Зависит от наземной инфраструктуры, подвержена локальным сбоям	Зависит от погодных условий (осадки), прямой видимости спутника, солнечной активности	Повышение общей надёжности за счёт взаимного резервирования каналов; ИИ-предикция доступности каналов и проактивное переключение для минимизации влияния негативных факторов

### **3.2. Концептуальная архитектура интеллектуальной системы**

На основе анализа существующих подходов к интеграции наземных и спутниковых систем [5, 6] и оценке возможностей применения искусственного интеллекта в управлении сетями [7, 12] была разработана концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления предлагаемой гибридной сетью, представленная на Рисунке 1. Данная архитектура предполагает наличие на пользовательском терминале (ПТ) мультиинтерфейсного модуля, способного одновременно или попеременно взаимодействовать с сетями 5G и Starlink. Центральным элементом системы является интеллектуальный контроллер (ИИ-контроллер), который может быть реализован как централизованно, так и распределённо. ИИ-контроллер агрегирует данные мониторинга состояния каналов (SINR, доступная полоса пропускания, задержка, уровень загруженности и др.) от обеих сетей, анализирует требования к качеству обслуживания (QoS) со стороны активных приложений пользователя, а также учитывает контекстную информацию (геопозиция, скорость и направление движения ПТ, предиктивные модели доступности спутников). На основе комплексного анализа этих данных ИИ-контроллер принимает оперативные решения о выборе оптимального сетевого интерфейса и параметрах соединения, включая инициацию и управление процедурами хэндовера между сегментами сети.

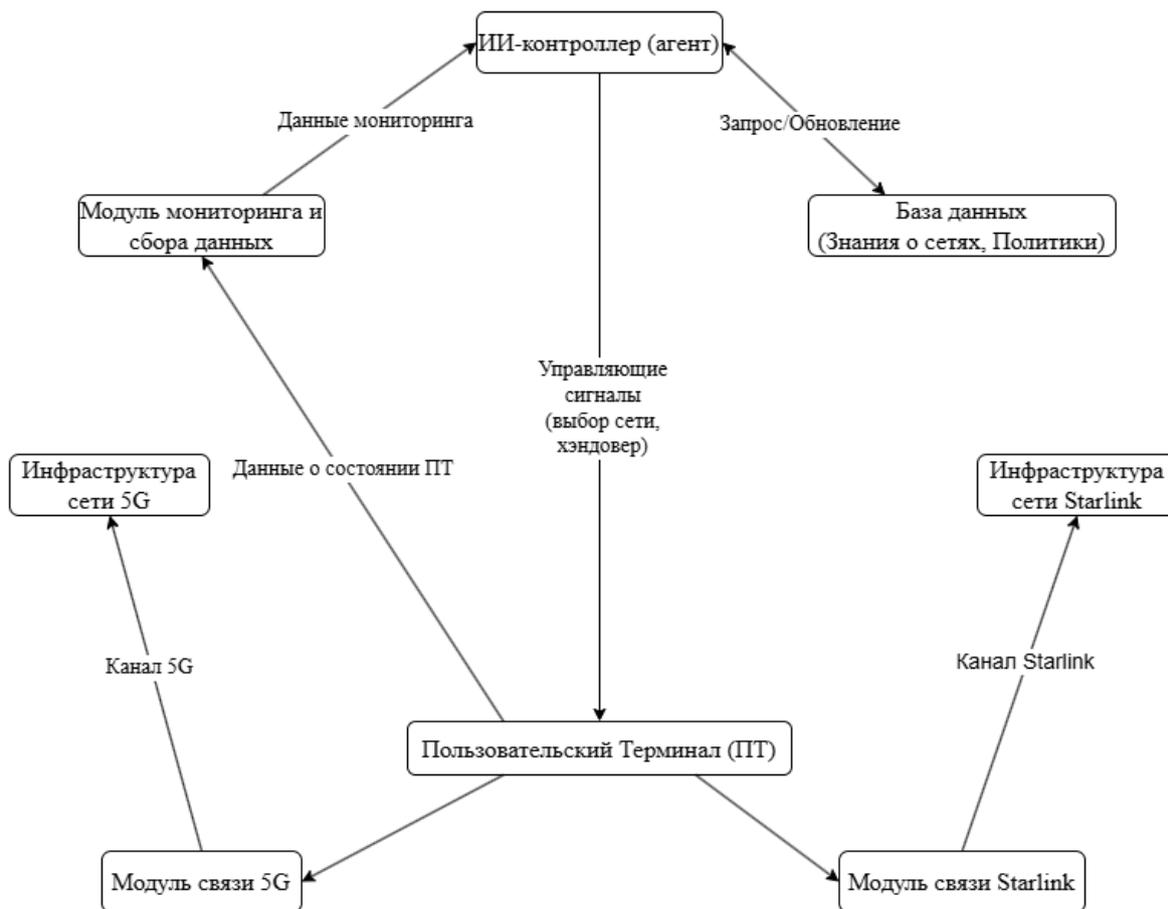


Рисунок 1 – Концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления гибридной сетью

Figure 1 - Conceptual architecture of an intelligent hybrid network management system

### 3.3. Обобщённый алгоритм функционирования ИИ-контроллера

Функционирование предложенного ИИ-контроллера может быть представлено в виде обобщённого многоэтапного алгоритма принятия решений, блок-схема которого приведена на Рисунке 2. Основные этапы алгоритма включают:

1. Непрерывный сбор и первичную обработку (фильтрацию, нормализацию) данных о текущем состоянии каналов связи 5G и Starlink, а также о динамических требованиях активных приложений пользователя к качеству обслуживания.

2. Предиктивный анализ ожидаемых изменений в состоянии каналов с использованием моделей машинного обучения (например, анализ временных рядов, рекуррентные нейронные сети) для прогнозирования их доступности и производительности на краткосрочную и среднесрочную перспективу.

3. Комплексную оценку ожидаемого качества обслуживания (QoS) для каждого из доступных каналов (5G или Starlink) на основе как текущих, так и прогнозируемых параметров.

4. Применение адаптивного решающего правила, которое может быть основано, например, на оптимизации многокритериальной функции полезности (4) или на использовании политики, выработанной с помощью методов обучения с подкреплением (5), для выбора оптимальной сети и определение параметров хэндовера.

5. Исполнение принятого решения (например, переключение на другой сетевой интерфейс) и последующий мониторинг результатов этого действия для обеспечения обратной связи и непрерывного дообучения ИИ-модели.

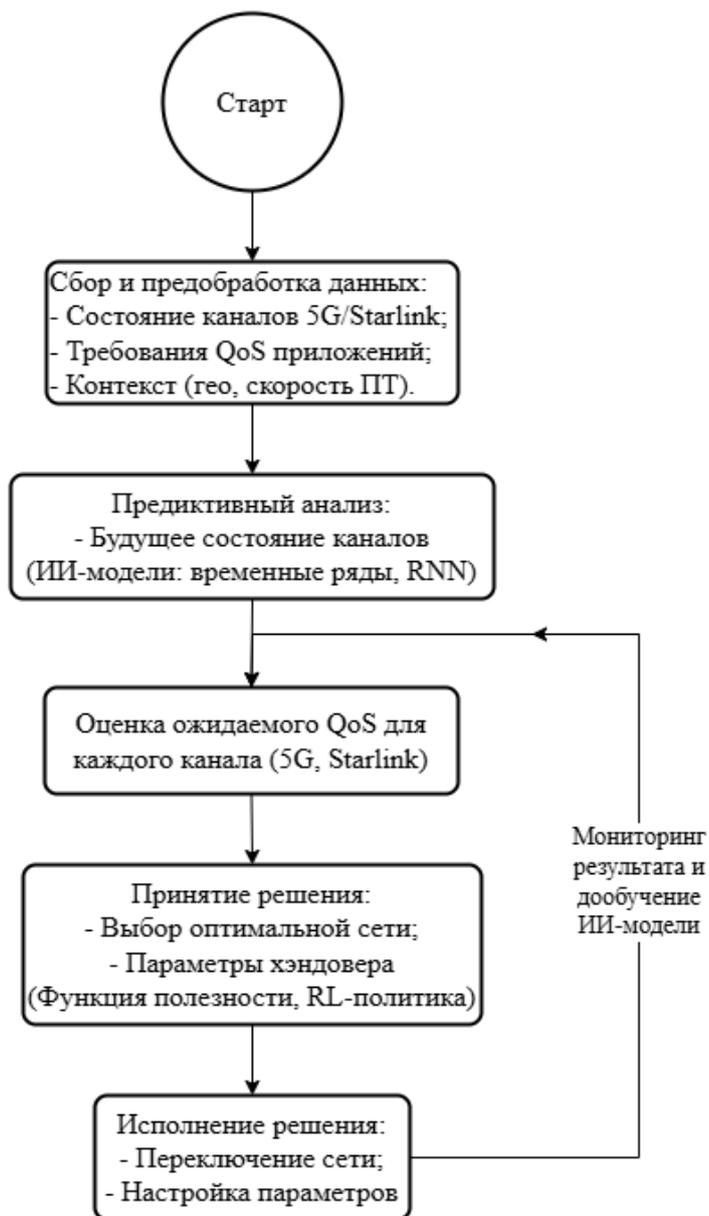


Рисунок 2 – Обобщённая блок-схема алгоритма функционирования ИИ-контроллера  
 Figure 2 - Generalized block diagram of the algorithm of AI controller functioning

### 3.4. Обоснование необходимости ИИ-управления и потенциальные преимущества

Проведённый анализ выявляет фундаментальное ограничение: существующие стандартные механизмы управления мобильностью и ресурсами, разработанные и оптимизированные для гомогенных сред сетей 5G и спутниковых систем по отдельности, не обладают необходимой гибкостью и функционалом для обеспечения эффективной динамической

интеграции столь разнородных технологий. Архитектурные различия, несопоставимые характеристики каналов связи и принципиально разные модели управления делают прямую аппликацию существующих протоколов для создания истинно бесшовной гибридной сети малопродуктивной, что обуславливает необходимость проведения исследований для определения требований к новым моделям управления и их последующей реализации. Сложность задачи оптимизации выбора сети в реальном времени, учитывающей множество быстро меняющихся параметров и предиктивных оценок, диктует необходимость разработки принципиально новых адаптивных систем управления на основе искусственного интеллекта. Традиционные алгоритмы с жёстко заданными порогами и детерминированными правилами заведомо не смогут обеспечить требуемый уровень адаптивности и эффективности. Для наглядной демонстрации потенциальных преимуществ предлагаемого гибридного подхода под интеллектуальным управлением на Рисунке 3 представлен гипотетический график, иллюстрирующий зависимость вероятности обеспечения бесперебойности соединения от условий эксплуатации. Ожидается, что гибридная система с ИИ-управлением продемонстрирует значительное превосходство по сравнению с использованием каждой из технологий по отдельности, особенно в переходных зонах и в условиях динамически меняющейся сетевой обстановки, за счёт интеллектуального и проактивного выбора наилучшего доступного ресурса.

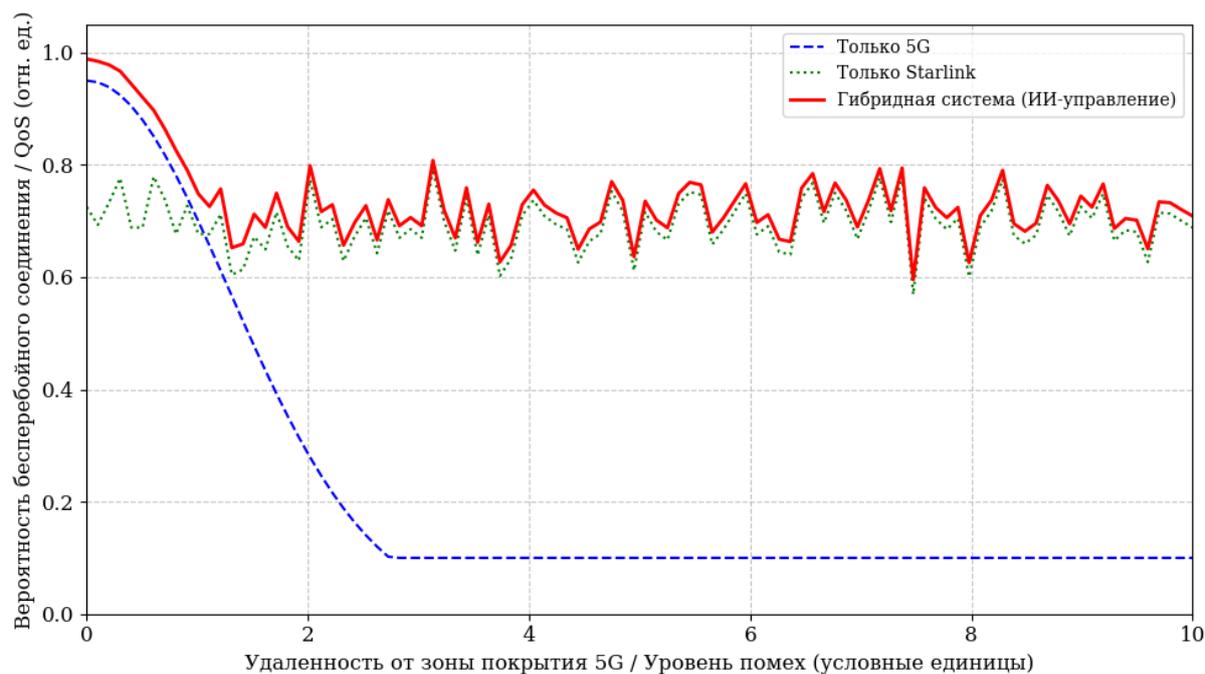


Рисунок 3 – Гипотетическая зависимость вероятности бесперебойного соединения от условий эксплуатации для различных сетевых конфигураций

Figure 3 - Hypothetical dependence of the probability of uninterrupted connection on operating conditions for different network configurations

## 4. Обсуждение

### 4.1. Значимость результатов

Представленные концептуальные результаты подчёркивают значительный потенциал интеллектуально управляемой интеграцией сетей пятого поколения и низкоорбитальных спутниковых систем Starlink для кардинального улучшения качества и доступности беспроводного интернет-соединения. Ключевая значимость заключается в теоретическом обосновании возможности создания адаптивной сетевой среды, способной динамически преодолевать имманентные ограничения каждой из технологий в отдельности. Выявленная комплементарность характеристик 5G и Starlink (Таблица 1) является не просто суммой их достоинств, а открывает путь к формированию системы с эмерджентными свойствами, такими как повышенная отказоустойчивость и непрерывность обслуживания. Предложенная концептуальная архитектура (Рисунок 1) и

алгоритм функционирования ИИ-контроллера (Рисунок 2) демонстрируют принципиальную реализуемость интеллектуального уровня управления [20-21], способного учитывать контекст, прогнозировать изменения сетевой обстановки и принимать проактивные решения [22]. Это особенно важно в условиях высокой мобильности пользователей и на территориях с неоднородным или отсутствующим покрытием традиционных наземных сетей.

#### **4.2. Сравнение с предыдущими исследованиями**

Сопоставление предлагаемого подхода с существующими научными работами выявляет как преемственность, так и определённую новизну. Общие принципы интеграции наземных и наземных сетей (TN-NTN) активно прорабатываются в литературе [5, 6], формируя архитектурные предпосылки. Также широко исследуется применение метода искусственного интеллекта для управления ресурсами и качеством обслуживания в гетерогенных сетях [7, 12] и для решения задач предиктивного хэндовера [8]. Однако большинство существующих работ рассматривают более общие архитектуры TN-NTN, либо фокусируются на применении ИИ в рамках одной технологии для интеграции сетей с менее выраженными различиями в характеристиках. Специфика интеллектуальной оркестровки взаимодействия высокодинамичных LEO-систем типа Starlink с наземной инфраструктурой 5G, учитывающая уникальные особенности спутниковых каналов, необходимость частых переключений лучей и особые требования к минимизации задержек и потерь при вертикальном хэндовере, остаётся менее исследованной областью. Таким образом, настоящее исследование позиционируется на стыке нескольких научных направлений, стремясь заполнить пробел в разработке специализированных ИИ-решений для данной конкретной, но крайне актуальной технологической пары. Предполагается, что

существующие общие ИИ-алгоритмы потребуют существенной адаптации для учёта специфики LEO-систем.

#### **4.3. Ограничения и перспективы**

Необходимо признать, что настоящее исследование, носящее обзорно-постановочный и концептуальный характер, имеет ряд ограничений. Представленные архитектурные решения и алгоритмы являются высокоуровневыми и требуют дальнейшей детализации, математической формализации и всесторонней валидации посредством численного моделирования и экспериментальной апробации. Оценка реальной производительности, алгоритмической сложности, затрат на реализацию и потенциальных узких мест выходит за рамки данной работы.

Тем не менее, перспективы развития предложенного направления представляются значительными. Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на разработке конкретных ИИ-алгоритмов (например, на основе глубокого обучения с подкреплением), создании точных имитационных моделей гибридной сети, а также на решении вопросов, связанных с безопасностью такой интегрированной системы и стандартизацией интерфейсов взаимодействия между ИИ-контроллером и разнородными сетевыми сегментами. Преодоление этих вызовов откроет путь к созданию действительно интеллектуальных и адаптивных сетей связи.

#### **4.4. Вклад в науку и практику**

Предлагаемая концепция интеллектуального управления интеграцией сетей 5G и Starlink вносит вклад в развитие теории управления сложными гетерогенными сетями и теорию применения искусственного интеллекта в телекоммуникациях. Научная ценность заключается в систематизации подходов к интеграции разнородных беспроводных технологий и в обосновании необходимости применения ИИ для решения нетривиальных задач динамической оптимизации в таких системах.

Практический вклад данной работы заключается в формировании теоретического базиса для разработки нового поколения систем беспроводной связи, способность обеспечить бесперебойный и высококачественный доступ в Интернет для широкого круга пользователей и приложений. Реализация предложенных идей может способствовать решению проблемы «цифрового разрыва», повышению эффективности функционирования интеллектуальных транспортных систем, беспилотных технологий и других критически важных сервисов, требующих надёжной и повсеместной связи. Особую актуальность такие системы приобретают для агропромышленного комплекса, где они могут стать основой для полномасштабного внедрения технологий точного земледелия, обеспечивая надёжный сбор данных с сенсорных сетей на полях, управление автономной сельскохозяйственной техникой и оперативный обмен информацией на удалённых территориях, что, в конечном итоге, способствует повышению урожайности, оптимизации затрат и устойчивому развитию сельских регионов.

## **5. Заключение**

Проведённое в настоящей работе комплексное исследование, основанное на анализе современных научно-технических достижений и теоретическом синтезе, позволило сформулировать и обосновать концептуальную основу для перспективного направления развития беспроводных систем связи – интеграцию сетей пятого поколения и низкоорбитальных спутниковых систем типа Starlink под управлением искусственного интеллекта с целью обеспечения бесперебойного интернет-соединения. В ходе исследования был выполнен сравнительный анализ технических характеристик сетей 5G и системы Starlink, который выявил их выраженную комплементарность и подтвердил целесообразность их интеграции. Были изучены существующие подходы к объединению наземных и спутниковых сетей, что позволило идентифицировать

ключевые проблемы, связанные с управлением гетерогенностью и обеспечением бесшовности, и обосновать необходимость разработки новых интеллектуальных механизмов. Особое внимание было уделено исследованию потенциала применения методов искусственного интеллекта, в частности обучения с подкреплением и многокритериальной оптимизации, для решения задач динамического выбора сети и адаптивного управления ресурсами в гибридной сети. В результате была разработана предварительная концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления и определены ключевые метрики производительности для последующей оценки эффективности предлагаемых решений. На основе всего вышеизложенного сформулировано аргументированное предложение о необходимости проведения дальнейших углублённых исследований, реализация которых имеет важное прикладное значение, в том числе для цифровизации агропромышленного комплекса и поддержки технологий точного земледелия, требующих стабильной и повсеместной связи на сельскохозяйственных территориях.

### Список литературы

1. Rangan S., Rappaport T. S., Erkip, E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges. *Proceedings of the IEEE*, 2014;102(3):366–385. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397
2. Giordani M, Polese M, Mezzavilla M, Rangan S, Zorzi M. Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies. *IEEE Commun Mag.* 2020;58(3):55-61. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900411
3. Mohan N., Ferguson A., Cech H, et al. A Multifaceted Look at Starlink Performance. *In Proceedings of the 2024 ACM Internet Measurement Conference (IMC '24)*, 2024;2723–2734. DOI: 10.1145/3589334.3645328
4. Raman A., Varvello M., Chang H., Sastry N., & Zaki Y. Dissecting the Performance of Satellite Network Operators. *Proceedings of the ACM on Networking, 1(CoNEXT3)*. 2023;Article 15. DOI: 10.1145/3629137
5. Liu J., Shi Y., Fadlullah Z. M., & Kato N. Space-air-ground integrated network: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018;20(4):2714–2741. DOI: 10.1109/COMST.2018.2841996

6. Heydarishahreza N., Han T., Ansari N. Spectrum Sharing and Interference Management for 6G LEO Satellite-Terrestrial Network Integration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2024;26(1):123–156. DOI: 10.1109/COMST.2024.3507019
7. Manap S., Dimyati K., Hindia N., Talip M., Tafazolli R. Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks. *IEEE Access*. 2020;PP(99): 131202-131223. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3002252
8. Thillaigovindhan S.K., Roslee M., Mitani S.M.I., Osman A.F., Ali F.Z. A Comprehensive Survey on Machine Learning Methods for Handover Optimization in 5G Networks. *Electronics*. 2024;13(16):3223. DOI: 10.3390/electronics13163223
9. Kulin M., Kazaz T., De Poorter E., Moerman I. A survey on machine learning-based performance improvement of wireless networks: PHY, MAC and network layer. *Electronics*. 2021;10(3):318. DOI: 10.3390/electronics10030318
10. Zhang S., Zhu D., Wang Y. A survey on space-aerial-terrestrial integrated 5G networks. *Computer Networks*. 2020;174:107212. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107212
11. Chen J., Zhang H., Xie Z. Space-air-ground integrated network (SAGIN): A survey. *arXiv*. 2024;0199. DOI: 10.48550/arXiv.2307.14697
12. Bartoli G., Marabissi D., Pucci R., Ronga L.S. AI Based Network and Radio Resource Management in 5G HetNets. *Journal of Signal Processing Systems*. 2017;89(1):133–143. DOI: 10.1007/s11265-017-1223-0
13. Zhu Q., Wang C., Hua B., et al. 3GPP TR 38.901 V14.0.0 (2017-05). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. ETSI TR 138 901 version 14.0.0 Release 14. DOI:10.1002/9781119471509.w5gref048
14. Tomaz L. M., Capsoni C., Luini L. Model to Scale Rain Attenuation Time Series With Link Elevation Angle for LEO Satellite Based Systems. *Radio Science*. 2023;58(1):e2022RS007551. DOI: 10.1029/2022RS007551
15. Rappaport TS. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR; 2002
16. Shaw, J. A. Radiometry and the Friis Transmission Equation. *American Journal of Physics*. 2013;81(1):33–37. DOI: 10.1119/1.4755780
17. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
18. Shannon CE. A mathematical theory of communication. *Bell Syst Tech J*. 1948;27(3):379-423
19. Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*. 2015;518(7540):529-533. DOI: 10.1038/nature14236
20. Крепышев Д.А. Интеллектуальная оптимизация динамической маршрутизации: методы, достижения и перспективы / Д.А. Крепышев, М.Е. Мирошниченко, В.В. Тараненко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2025. – №03(207). С. 235 – 244. – IDA [article ID]: 2072503020. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/20.pdf>, 0,625 у.п.л.
21. Нитовкин И.Д. Оптимальная топология для высокопроизводительных компьютерных сетей / И.Д. Нитовкин, Д.А. Крепышев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2025. – №04(208). С. 71 – 78. – IDA [article ID]: 2082504008. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/08.pdf>, 0,5 у.п.л.
22. Крепышев Д.А. Искусственный интеллект в различных операционных системах управления предприятием / Д.А. Крепышев // Политематический сетевой

электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2024. – №09(203). С. 454 – 459. – IDA [article ID]: 2032409041. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2024/09/pdf/41.pdf>, 0,375 у.п.л.

## References

1. Rangan S., Rappaport T. S., Erkip, E. Millimeter Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges. *Proceedings of the IEEE*, 2014;102(3):366–385. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397
2. Giordani M, Polese M, Mezzavilla M, Rangan S, Zorzi M. Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies. *IEEE Commun Mag.* 2020;58(3):55-61. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900411
3. Mohan N., Ferguson A., Cech H, et al. A Multifaceted Look at Starlink Performance. In *Proceedings of the 2024 ACM Internet Measurement Conference (IMC '24)*, 2024;2723–2734. DOI: 10.1145/3589334.3645328
4. Raman A., Varvello M., Chang H., Sastry N., & Zaki Y. Dissecting the Performance of Satellite Network Operators. *Proceedings of the ACM on Networking*, 1(CoNEXT3). 2023;Article 15. DOI: 10.1145/3629137
5. Liu J., Shi Y., Fadlullah Z. M., & Kato N. Space-air-ground integrated network: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2018;20(4):2714–2741. DOI: 10.1109/COMST.2018.2841996
6. Heydarishahreza N., Han T., Ansari N. Spectrum Sharing and Interference Management for 6G LEO Satellite-Terrestrial Network Integration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2024;26(1):123–156. DOI: 10.1109/COMST.2024.3507019
7. Manap S., Dimiyati K., Hindia N., Talip M., Tafazolli R. Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks. *IEEE Access.* 2020;PP(99): 131202-131223. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3002252
8. Thillaigovindhan S.K., Roslee M., Mitani S.M.I., Osman A.F., Ali F.Z. A Comprehensive Survey on Machine Learning Methods for Handover Optimization in 5G Networks. *Electronics.* 2024;13(16):3223. DOI: 10.3390/electronics13163223
9. Kulin M., Kazaz T., De Poorter E., Moerman I. A survey on machine learning-based performance improvement of wireless networks: PHY, MAC and network layer. *Electronics.* 2021;10(3):318. DOI: 10.3390/electronics10030318
10. Zhang S., Zhu D., Wang Y. A survey on space-aerial-terrestrial integrated 5G networks. *Computer Networks.* 2020;174:107212. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107212
11. Chen J., Zhang H., Xie Z. Space-air-ground integrated network (SAGIN): A survey. *arXiv.* 2024;0199. DOI: 10.48550/arXiv.2307.14697
12. Bartoli G., Marabissi D., Pucci R., Ronga L. S. AI Based Network and Radio Resource Management in 5G HetNets. *Journal of Signal Processing Systems.* 2017;89(1):133–143. DOI: 10.1007/s11265-017-1223-0
13. Zhu Q., Wang C., Hua B., et al. 3GPP TR 38.901 V14.0.0 (2017-05). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. ETSI TR 138 901 version 14.0.0 Release 14. DOI:10.1002/9781119471509.w5gref048
14. Tomaz L. M., Capsoni C., Luini L. Model to Scale Rain Attenuation Time Series With Link Elevation Angle for LEO Satellite Based Systems. *Radio Science.* 2023;58(1):e2022RS007551. DOI: 10.1029/2022RS007551
15. Rappaport TS. *Wireless Communications: Principles and Practice.* 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR; 2002

16. Shaw, J. A. Radiometry and the Friis Transmission Equation. American Journal of Physics. 2013;81(1):33–37. DOI: 10.1119/1.4755780
17. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
18. Shannon CE. A mathematical theory of communication. Bell Syst Tech J. 1948;27(3):379-423
19. Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning. Nature. 2015;518(7540):529-533. DOI: 10.1038/nature14236
20. Krepyshev D.A. Intellektual'naja optimizacija dinamicheskoy marshrutizacii: metody, dostizhenija i perspektivy / D.A. Krepyshev, M.E. Miroshnichenko, V.V. Taranenko // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2025. – №03(207). S. 235 – 244. – IDA [article ID]: 2072503020. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/20.pdf>, 0,625 u.p.l.
21. Nitovkin I.D. Optimal'naja topologija dlja vysokoproizvoditel'nyh komp'juternyh setej / I.D. Nitovkin, D.A. Krepyshev // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2025. – №04(208). S. 71 – 78. – IDA [article ID]: 2082504008. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/08.pdf>, 0,5 u.p.l.
22. Krepyshev D.A. Iskusstvennyj intellekt v razlichnyh operacionnyh sistemah upravlenija predpriatiem / D.A. Krepyshev // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2024. – №09(203). S. 454 – 459. – IDA [article ID]: 2032409041. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2024/09/pdf/41.pdf>, 0,375 u.p.l.