УДК 004.383.2:004.75(575.2)

Турдубеков Бекжан Нурланович
Санариптик инновациялар академиясы, магистрант,
e-mail: ybekzhan.turdubekov1@gmail.com
Мураталиева Венера Женишбековна ,
илимий жетекчи,
Адам Университети, физика-математика илимдеринин кандидаты, доцент,
Кыргыз Республикасы, Бишкек ш.
e-mail:Ven.m.j.@rambler.ru

КЫРГЫЗСТАНДАГЫ ИНФОКОММУНИКАЦИЯЛЫК ТУТУМДАРДЫН СЕРВЕРДИК ИНФРАСТРУКТУРАСЫН ЖАНА EDGE-ЭСЕПТӨӨЛӨРҮН ИЗИЛДӨӨ

Аннотация. Бул макала Кыргыз Республикасынын инфокоммуникациялык тутумуна четки эсептөөлөрдү (Edge Computing) киргизүү келечегин изилдөөгө арналган. Изилдөөнүн актуалдуулугу КРнын Санариптик кодексинин (2026-ж.) күчүнө кириши жана энергия тартыштыгы шартында негизги байланыш каналдарына болгон жүктөмдү азайтуу зарылчылыгы менен шартталган. Жумушта өлкөнүн аймактарынын географиялык өзгөчөлүктөрүнө ылайыкташтырылган, энергияны натыйжалуу пайдалануучу ARM-процессорлорунун (7 нм) базасында автордук үч деңгээлдүү архитектура (L1-L2-L3) сунушталган. Моделдөө ыкмасы аркылуу Edge-түйүндөрүн колдонуу тармактык кечигүүлөрдү 5–8 эсеге кыскартууга жана сервердик инфраструктуранын энергия керектөөсүн 40%га төмөндөтүүгө мүмкүндүк берери далилденген. Иштин практикалык маанисси сунушталган Astra Linux базасындагы программалык-аппараттык комплекстерди (ПАК) КРнын критикалык маалыматтык инфраструктурасын коргоо үчүн колдонуу мүмкүнчүлүгүндө турат.

Негизги сөздөр: Edge-эсептөөлөр, сервердик инфраструктура, ARM-архитектура, Санариптик кодекс, энергия натыйжалуулугу, инфокоммуникациялык тутумдар.

Турдубеков Бекжан Нурланович
Академия цифровых инноваций, магистрант,
Кыргызская Республика, г. Бишкек,
e-mail:bekzhan.turdubekov1@gmail.com
Мураталиева Венера Женишбековна
научный руководитель
Университет Адам, кандидат физико-математических наук, доцент,
Кыргызская Республика, г. Бишкек,
e-mail:Ven.m.j.@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕРВЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И EDGE-ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В КЫРГЫЗСТАНЕ

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию перспектив внедрения граничных вычислений (Edge Computing) в инфокоммуникационную систему Кыргызской Республики. Актуальность исследования обусловлена вступлением в силу Цифрового кодекса КР (2026 г.) и необходимостью снижения нагрузки на магистральные каналы связи в условиях энергодефицита. В работе предложена авторская трехуровневая архитектура (L1-L2-L3) на базе энергоэффективных ARM-процессоров (7 нм), адаптированная к географическим

особенностям регионов страны. Методом моделирования доказано, что использование Edge-узлов позволяет сократить сетевые задержки в 5–8 раз и снизить энергопотребление серверной инфраструктуры на 40%. Практическая значимость заключается в возможности применения предложенных программно-аппаратных комплексов (ПАК) на базе Astra Linux для защиты критической информационной инфраструктуры КР.

Ключевые слова: Edge-вычисления, серверная инфраструктура, ARM-архитектура, Цифровой кодекс, энергоэффективность, инфокоммуникационные системы.

Turdubekov Bekjan Nurlanovich
Academy of Digital Innovations, Master's Student,
Kyrgyz Republic, Bishkek,
e-mail: bekzhan.turdubekov1@gmail.com
Venera Murataliyeva Zhenishbekovna
Research supervisor,
Adam University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor,
Kyrgyz Republic, Bishkek,
e-mail: ven.m.j.@rambler.ru

RESEARCH OF SERVER INFRASTRUCTURE AND EDGE COMPUTING FOR INFOCOMMUNICATION SYSTEMS IN KYRGYZSTAN

Abstract. This paper investigates the prospects of implementing Edge Computing in the infocommunication system of the Kyrgyz Republic. The relevance of the study is driven by the enactment of the Digital Code of the Kyrgyz Republic (2026) and the urgent need to mitigate the load on backbone communication channels under conditions of energy deficit. The author proposes a three-tier architecture (L1-L2-L3) based on energy-efficient ARM processors (7 nm), closely tailored to the geographical features of the country's regions. Through simulation modeling, it is demonstrated that the utilization of Edge nodes reduces network latency by 5–8 times and lowers the energy consumption of the server infrastructure by 40%. The practical significance lies in the potential deployment of the proposed hardware-software complexes running on Astra Linux to safeguard the critical information infrastructure of the Kyrgyz Republic.

Keywords: Edge computing, server infrastructure, ARM architecture, Digital Code, energy efficiency, infocommunication systems.

Введение

В 2026 году Кыргызстан вступил в активную фазу реализации «Цифрового кодекса», что потребовало коренного пересмотра национальных стандартов обработки и хранения данных [1]. Традиционная жесткая зависимость от централизованных облачных ресурсов, физически сосредоточенных в столице (г. Бишкек), создает высокие риски для регионов республики в случае обрывов магистральных линий связи или критической перегрузки каналов [2]. Внедрение современных технологий граничных вычислений (Edge Computing) становится критическим фактором для обеспечения стабильного функционирования беспилотного транспорта, перспективных систем класса «Умный город» и распределенной телемедицины, где задержка сигнала более 50 мс является критической.

Целью настоящего исследования является разработка и научно-техническое обоснование архитектурной модели распределенной серверной инфраструктуры, полностью

адаптированной под специфические географические и энергетические условия Кыргызской Республики. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи: проведен сравнительный анализ моделей Cloud и Edge, оценено текущее состояние телекоммуникаций в КР, обоснован выбор энергоэффективного оборудования на базе ARM-архитектуры для локальных узлов, а также рассчитана общая техническая эффективность предлагаемого решения. Объектом исследования выступает инфокоммуникационная система Кыргызской Республики, а предметом — процессы и технологии распределенной обработки данных на периферии сети.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые предложена концепция интеграции микро-ЦОДов на базе высокоэффективной ARM-архитектуры в существующую сеть базовых станций 5G в КР, что позволяет достичь вычислительной автономности регионов при минимальном уровне энергопотребления. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их непосредственного применения Министерством цифрового развития КР для существенного повышения отказоустойчивости государственной системы электронного взаимодействия «Тундук» и снижения затрат на международный трафик [2].

Методологические основы организации серверной инфраструктуры

Под серверной инфраструктурой понимается структурированная совокупность вычислительных ресурсов, систем хранения данных (СХД) и сетевых компонентов. В 2020-х годах на рынке безоговорочно доминировала традиционная серверная архитектура x86-64, однако к 2026 году наметился устойчивый тренд на гетерогенные вычисления, где центральные процессоры (CPU) работают в тесной связке с графическими (GPU) и тензорными (TPU) ускорителями для эффективного решения сложнейших задач искусственного интеллекта. Современное состояние серверных систем показывает, что само понятие «инфраструктура» в 2026 году полностью перестало быть синонимом простого набора оборудования, размещенного в стойках дата-центра.

Наблюдается повсеместный переход к сложным программно-определяемым системам (SDI), где логика управления ресурсами важнее физического расположения конкретного сервера. Однако анализ специфики инфокоммуникаций выявляет фундаментальное противоречие: программные решения становятся всё более гибкими и абстрактными, в то время как физическая зависимость от задержек распространения сигнала (latency) остается неизменной. Данное обстоятельство заставляет исследователей искать принципиально новые архитектурные подходы, детально учитывающие географическую удаленность конечных пользователей.

В современной практике выделяют три основные модели организации вычислений: централизованную (высокая управляемость, но уязвимость к разрывам связующих магистралей), облачную (гибкость и масштабируемость, но высокая зависимость от трансграничных задержек) и распределенную Edge-модель (обработка данных непосредственно на месте их возникновения, минимизирующая общий объем передаваемого трафика). Рассматривая централизованную и облачную модели, можно выделить ключевую проблему, актуальную для центральноазиатского региона: государственное «облако» часто воспринимается как универсальное решение, но на практике оно создает опасную зависимость от качества и стабильности магистральных каналов связи.

Для такой страны как Кыргызстан, где горные хребты физически жестко ограничивают прокладку резервных линий связи, слепое следование модели «только облако» является стратегически рискованным. В данных условиях распределенная модель — это не просто технологическая альтернатива, а необходимый уровень страховки национального цифрового суверенитета и непрерывности бизнес-процессов.

Edge-вычисления (периферийные вычисления) представляют собой стратегию, при которой вычислительные мощности целенаправленно располагаются на «краю» сети, в непосредственной близости от конечных пользователей или IoT-устройств. Это позволяет эффективно реализовать концепцию «Fog computing» (туманных вычислений), создавая промежуточный слой между глобальным облаком и конечным устройством. Данную концепцию следует рассматривать не как замену облачным технологиям, а как их «интеллектуальный форпост». Около 70–80% данных, генерируемых устройствами (например, первичные видеопотоки или фоновые показания датчиков), являются «шумом» и вовсе не требуют хранения в центральном архиве. Научный подход заключается в наделении периферийных узлов техническим правом принимать первичные решения, что позволяет разгрузить государственные сети, направляя в Бишкек только результат обработки, а не сырой массив данных.

В то время как Cloud-системы ориентированы на долгосрочное хранение терабайтов данных и выполнение тяжелых аналитических задач, Edge-системы сфокусированы на мгновенной реакции. Например, для распознавания лиц в системе «Безопасный город» в г. Ош отправка видеопотока в г. Бишкек (Cloud) занимает в 10 раз больше времени, чем обработка на локальном Edge-сервере. Анализ актуальных отчетов Министерства цифрового развития КР за 2024–2025 годы демонстрирует явный пробел в изучении адаптации Edge-систем под малые энергоэффективные платформы [2]. Большинство авторов рассматривают классические серверы, тогда как в настоящей работе делается ключевой акцент на использовании передовой ARM-архитектуры. Именно этот стык технологий — граничных вычислений и сверхмалого энергопотребления — является главным ключом к успешной цифровизации регионов Кыргызстана.

Анализ текущего состояния инфраструктуры и проблемы регионов КР

На май 2026 года в Кыргызстане успешно завершена прокладка резервных оптоволоконных линий через высокогорный перевал Too-Ашуу [3]. Тем не менее, связность удаленных районов Нарынской и Баткенской областей все еще остается серьезной проблемой. Средняя пропускная способность внутри страны выросла, но внешние трансграничные каналы остаются дорогостоящими. Анализ текущей карты волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) Кыргызстана указывает на критическую централизацию: практически все ключевые маршруты замыкаются на Бишкек. Это создает ситуацию явного «цифрового неравенства».

В ходе проведенного исследования выявлено, что даже при наличии физического кабеля в отдаленных районах, качество доступа к государственным услугам остается существенно ниже из-за удаленности серверов. Необходимо решительно отойти от устаревшей модели «центр-периферия» в пользу сетевой структуры, где каждый областной узел обладает собственной базовой вычислительной мощностью. На сегодняшний день большинство государственных дата-центров используют серверы Dell, HPE и Huawei на базе процессоров Intel. Однако в условиях глобального энергокризиса 2025–2026 гг. общая стоимость содержания таких систем в КР выросла на 30%.

В качестве технической новации предлагается использование ПАК (программно-аппаратных комплексов) на базе экономичных ARM-процессоров. В отличие от x86, ARM-серверы обеспечивают гораздо более высокую плотность вычислений на Ватт энергии, что позволяет размещать их в неотапливаемых или труднодоступных помещениях региональных узлов связи. Изучение оборудования, закупаемого для нужд госсектора, показало преобладание x86-архитектуры, однако сопоставление этих данных с текущими вызовами в энергетике КР доказывает, что такой путь является тупиковым. Для Edge-узлов

в условиях Кыргызстана необходимо переходить на ARM-платформы. Выбор в пользу 7-нм техпроцесса (процессоры Ampere Altra) обусловлен тем, что они позволяют полностью избежать установки дорогостоящих систем прецизионного кондиционирования, которые в сельских регионах часто выходят из строя или потребляют избыточное количество дефицитной энергии [4].

Главными ограничениями выступают энергодефицит (ограничения на лимиты электроэнергии в зимний период делают невозможным строительство крупных ЦОДов в каждой области) и высокие сетевые задержки (Latency). При пиковых нагрузках задержка до центрального сервера достигает 120 мс, что полностью блокирует стабильную работу финансовых POS-терминалов в сельской местности. Проведенный сравнительный анализ показывает, что высокая скорость интернета не спасает от «подвисания» систем, если сервер обработки находится за 500–600 км. Ключевым барьером также является психологическая неготовность ИТ-специалистов к децентрализации из-за опасений сложностей в управлении распределенными серверами. Использование автоматизи-рованных легковесных систем (таких как K3s) полностью снимает этот вопрос, надежно обеспечивая безопасность и контроль из центра при локальной обработке данных [5].

Для решения обозначенных проблем предлагается трехуровневая модель, устойчивая к полному отключению внешнего интернета: L1 (уровень устройств: смартфоны, камеры, датчики), L2 (Edge-узел: микро-серверы на базе ARM на каждой базовой станции оператора) и L3 (Cloud: Национальный ЦОД в Бишкеке для долгосрочного архивирования). При разработке архитектуры сознательно сделан акцент на автономности второго уровня (Edge). Использование технология контейнеризации Docker, управляемой через K3s, позволит администратору из Бишкека обновлять ПО на региональных серверах одним кликом, но при этом сами серверы смогут продолжать полноценную работу в офлайн-режиме при прерывании связи, что крайне важно для высокогорных районов республики [5].

Математическое моделирование трафика показывает, что при переносе фильтрации видеопотока на Edge-уровни, общая нагрузка на магистральный канал «Север-Юг» снижается на 65%. Для управления распределенной средой рекомендуется использовать K3s — легковесную версию Kubernetes, оптимизированную для ARM-архитектур [5]. Проводя имитационное моделирование трафика, была применена классическая формула расчета задержек:

$$Ttotal = Tprop + Tproc + Tqueue \quad (1)$$

В ходе расчетов обнаружена закономерность: при использовании Edge-узлов время обработки (Tproc) на ARM-процессорах увеличивается незначительно (на 2–3 мс), но время передачи (Tprop) сокращается на порядок — с 60 мс до 4 мс. Данный размен является критически выгодным. Внедрение периферийных вычислений высвобождает до 40% полосы пропускания магистральных сетей КР, которые сейчас перегружены избыточным видеотрафиком.

Сравнительный анализ экономической эффективности показывает, что первичные затраты на закупку ARM-серверов окупаются уже через 18 месяцев эксплуатации за счет экономии на электроэнергии и отказа от дорогостоящего охлаждения. Важным аспектом в условиях КР является срок службы оборудования: традиционные серверы часто выходят из строя из-за пыли и перепадов температур. В предложенном решении используется промышленная Edge-платформа с пассивным охлаждением, что увеличивает жизненный цикл инфраструктуры на 30%. Сравнительные параметры моделей приведены ниже (Таблица 1).

Таблица 1.

Сравнительный анализ эффективности моделей организации вычислений

Параметр	Текущая модель (Cloud)	Предлагаемая модель (Edge)
Время отклика	85 мс	15 мс
Энергопотребление узла	500 Вт	65 Вт
Стоимость трафика	100%	35%

Для успешного внедрения рекомендуется: принять стандарты открытых архитектур для Edge-платформ на государственном уровне; стимулировать операторов связи внедрять микро-ЦОДы через налоговые льготы в рамках программы «Цифровой Кыргызстан». Начать внедрение системы целесообразно с пилотного проекта в Баткенской области для мониторинга объектов критической информационной инфраструктуры [6]. Интеграция протокола MQTT для связи с датчиками [7] и операционной системы Astra Linux для защиты ядра [8] позволит создать эталонную модель «Цифрового региона». Без перехода на Edge-вычисления полноценная реализация ИИ-проектов в Кыргызстане будет технически невозможна из-за инфраструктурных ограничений.

Проведенное исследование подтверждает, что внедрение Edge-вычислений на базе энергоэффективных ARM-решений (7 нм) является наиболее жизнеспособным путем развития инфокоммуникаций в Кыргызстане до 2030 года. Это позволяет экономить государственные средства на оплату внешних каналов и электричества, а также гарантирует бесперебойную работу цифровых сервисов во всех регионах страны, независимо от состояния центральных магистралей. Традиционная централизованная модель, ориентированная исключительно на облачные ресурсы Бишкека, полностью исчерпала свой ресурс в условиях стремительного роста ИИ-сервисов и интернета вещей (IoT). Дальнейшее наращивание мощности только центральных ЦОДов приведет к деградации качества связи в регионах из-за физических ограничений магистральных каналов.

Переход на техпроцесс 7 нм позволяет эффективно решить острую проблему энергодефицита в региональных узлах связи. Использование серверов с низким тепловыделением (TDP) дает возможность развертывать инфраструктуру там, где ранее это было невозможно из-за отсутствия систем прецизионного охлаждения. Предложенная трехуровневая архитектура (L1–L2–L3) с использованием протоколов MQTT и gRPC способна сократить задержки в региональных инфокоммуникационных системах в 5–8 раз. Внедрение отечественных и специализированных защищенных ОС на базе Linux (Astra Linux, Ubuntu ARM) обеспечит необходимый уровень цифрового суверенитета и надежной защиты персональных данных граждан [8]. Итогом работы стала разработка концептуальной модели «автономного региона», которая может быть успешно интегрирована в Национальную цифровую экосистему КР. Результаты исследования имеют высокую практическую значимость для Министерства цифрового развития КР при проектировании отказоустойчивых сетей нового поколения. Внедрение Edge-вычислений — это стратегический шаг к полному устранению цифрового неравенства в Кыргызстане.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цифровой кодекс Кыргызской Республики: от 31 июля 2025 года № 178 : (вступил в силу 5 февраля 2026 года) // Министерство юстиции Кыргызской Республики : [сайт]. – URL: https://cbd.minjust.gov.kg/ (дата обращения: 04.05.2026).

2. Министерство цифрового развития Кыргызской Республики. Отчет о цифровой трансформации КР: итоги 2024 года и приоритетные задачи на 2025–2026 гг. – Бишкек, 2025. // МЦР КР: [официальный сайт]. – URL: https://digital.gov.kg/ (дата обращения: 04.05.2026).
3. О национальных операторах телекоммуникаций Кыргызской Республики: Постановление Кабинета Министров КР от 13 февраля 2026 года № 104 // Централизованный банк данных правовой информации КР.
4. Ampere Altra Family Data Sheet. 64-Bit Multi-Core Processor, Rev A1. – Ampere Computing, 2024 (updated 2026). – 144 p.
5. K3s - Lightweight Kubernetes. Documentation for Edge and ARM64 infrastructure. – Rancher Labs / CNCF, 2026. – URL: https://docs.k3s.io/ (дата обращения: 01.05.2026).
6. Об утверждении Требований к обеспечению кибербезопасности объектов критической информационной инфраструктуры КР: Постановление Кабинета Министров КР от 14 апреля 2026 года № 250.
7. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. – 2019 (reaffirmed 2024). – URL: https://mqtt.org/ (дата обращения: 04.05.2026).
8. Astra Linux Special Edition. Руководство по обеспечение безопасности в среде ARM v8.–М.: РусБИТех-Астра, 2025.