

Обзорная статья

УДК 004.75

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144>

EDN:HYREKC



Сеть вычислительных мощностей (CPN)

✉ Александр Владимирович Росляков, a.roslyakov@psuti.ru

Павел Алексеевич Алексахин, p.aleksahin@psuti.ru

Валерий Андреевич Михайлов, v.mihaylov@psuti.ru

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

Аннотация

В данной статье рассматривается концепция сети вычислительных мощностей CPN (Computing Power Network) – новой парадигмы распределенных вычислений, предназначенной для распределения, управления и оптимального использования вычислительных ресурсов по запросу пользователей по аналогии с распределением электрической энергии в энергосистемах.

Актуальность исследования обусловлена тем, что с развитием цифрового общества все больше и больше приложений требуют не только высокой вычислительной мощности, но и низкой задержки, что делает вычисления и сети связи тесно интегрированными. В отличие от технологий облачных, граничных и туманных вычислений, требуется новая парадигма организации территориально-распределенных вычислений, которая сможет обеспечить более гибкое, эффективное и качественное предоставление вычислительных мощностей по запросу пользователей для поддержки разнообразных перспективных приложений (искусственный интеллект / машинное обучение, анализ больших данных, промышленный интернет вещей, умное производство, беспилотный транспорт и др.). По аналогии с распределением электрической энергии в энергосистемах, сравнительно недавно была предложена новая модель распределения вычислительных ресурсов – CPN. Она представляет «вычислительную энергию», которая может передаваться, накапливаться и потребляться в распределенной сети узлов – аналогично тому, как электрическая энергия распределяется между генераторами, подстанциями и потребителями в энергосетях.

Цель исследования – изучение архитектурных и функциональных особенностей сетей вычислительных мощностей, а также анализ современного состояния международной стандартизации данной технологии.

Методы включают обзор научной и нормативной литературы, оценку состояния уровня международной стандартизации технологий сетей вычислительных мощностей.

Результаты. В ходе исследования были проанализированы общие принципы построения, структура и функциональная архитектура сети вычислительных мощностей и определено, что для полноценного функционирования CPN требуется развитая сетевая инфраструктура, прежде всего на базе технологий программно-конфигурируемых сетей SDN и платформ управления сетью с использованием искусственного интеллекта.

Новизна. Проведенное исследование является первой попыткой провести системный анализ концепции сети вычислительных мощностей в контексте русскоязычной научной литературы. Работа восполняет существующий пробел в отечественной науке, предлагая всесторонний взгляд на возможности построения и функционирования сети вычислительных мощностей с использованием технологий существующих и перспективных сетей связи.

Теоретическая значимость работы заключается в создании основы для изучения и интеграции перспективных сетей фиксированной F5G и мобильной 5G / 6G связи с облачными и периферийными вычислениями для реализации концепции сети вычислительных мощностей.

Ключевые слова: распределенные вычисления, облачные вычисления, периферийные вычисления, сеть вычислительных мощностей, архитектура, принцип работы, стандарты МСЭ-Т

Ссылка для цитирования: Росляков А.В., Алексахин П.А., Михайлов В.А. Сеть вычислительных мощностей (CPN) // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 127–144. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144. EDN:HYREKC

Review research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144>
EDN:HYREKC

Computing Power Network (CPN)

✉ **Alexandr V. Roslyakov**, a.roslyakov@psuti.ru
Pavel A. Aleksakhin, p.aleksahin@psuti.ru
Valery A. Mikhailov, v.mihaylov@psuti.ru

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, 443010, Russian Federation

Annotation

This article discusses the concept of the Computing Power Network (CPN), a new paradigm of distributed computing designed to distribute, manage and optimally use computing resources on demand by users, similar to the distribution of electrical energy in power systems.

The relevance of the study is due to the fact that with the development of the digital society, more and more applications require not only high computing power, but also low latency, which makes computing and communication networks tightly integrated. In contrast to cloud, edge and fog computing technologies, a new paradigm for organizing geographically distributed computing is required that can provide more flexible, efficient and high-quality provision of computing power on demand by users to support a variety of promising applications (artificial intelligence / machine learning, big data analysis, industrial Internet of Things, smart manufacturing, unmanned transport, etc.). By analogy with the distribution of electrical energy in power systems, a new model for distributing computing resources was recently proposed - CPN. It provides computing power as "computing energy" that can be transmitted, accumulated and consumed in a distributed network of nodes - similar to how electrical energy is distributed between generators, substations and consumers in power grids.

The aim of this study is to study the architectural and functional features of computing power networks, as well as to analyze the current state of international standardization of this technology.

Methods include analysis of scientific and regulatory literature, assessment of the state of the level of international standardization of computing power network technologies.

Results. The study analyzed the general principles of construction, structure and functional architecture of the computing power network, and determined that the full functioning of CPN requires a developed network infrastructure, primarily based on software-defined network technologies SDN and network management platforms using artificial intelligence.

Scientific novelty. The study is the first attempt to conduct a system analysis of the computing power network concept in the context of Russian-language scientific literature. The work fills the existing gap in domestic science, offering a comprehensive view of the possibilities of building and operating a network of computing power using technologies of existing and prospective communication networks.

The theoretical significance of the work lies in creating a basis for studying and integrating prospective fixed and mobile 5G / 6G communication networks with cloud and edge computing to implement the concept of a network of computing power.

Keywords: distributed computing, cloud computing, edge computing, computing power network, architecture, operating principle, ITU-T standards

For citation: Roslyakov A.V., Aleksakhin P.A., Mikhailov V.A. Computing Power Networks (CPN). *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):127–144. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-127-144. EDN:HYREKC

Введение

Современное развитие цифровых технологий и их активное проникновение в различные отрасли и

сферы человеческой деятельности сопровождается стремительным ростом вычислительных мощностей и увеличением количества распределенных

вычислительных систем. Так, широкомасштабное применение алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в различных отраслях требует больших вычислительных ресурсов. В эпоху облачных вычислений существует тенденция к созданию централизованных пулов вычислительных ресурсов для решения этой проблемы. Однако в ряде случаев эти централизованные пулы не удовлетворяют требованиям выполняемых задач, поскольку необходимо выбирать соответствующие узлы вычислительной мощности с учетом характеристик приложений, стоимости вычислений и условий работы сети.

Необходимость повсеместных вычислительных ресурсов объясняет пример аппаратно-программной системы контроля и управления доступом, основанной на распознавании лиц на базе ИИ (рис. 1) [1]. В этой системе выполнение сложных вычислительных процессов для обучения ИИ в автономном режиме может быть развернуто в централизованных вычислительных центрах, таких как облачный дата-центр. Однако на этапе анализа изображений, например, при распознавании лица для открытия двери, следует учитывать фактор задержки. Если изображение или видеoinформация отправляются в центр облачных вычислений для обработки, время ожидания может оказаться слишком большим и неприемлемым на практике.



Рис. 1. Система управления доступом на основе распознавания лица (источник: МСЭ-Т)

Fig. 1. Access Control System Based on Face Recognition (Source: ITU-T)

Следовательно, при реализации конкретной услуги следует учитывать не только необходимые ресурсы вычислительной мощности, а также время и стоимость обработки и передачи данных. Полностью централизованные пулы вычислительных ресурсов не всегда могут удовлетворить этим требованиям, в то время как распределенные решения, такие как периферийные вычислительные узлы, обладают очевидными преимуществами в отношении пропускной способности и задержки, что позволяет удовлетворять требования конкретных услуг.

В условиях глобальной цифровизации особое значение приобретает рациональное использо-

вание вычислительных и энергетических ресурсов, что требует новых подходов к организации вычислений и управления ими. Эффективным решением этой проблемы является объединение территориально распределенных ресурсов вычислений и хранения данных в единую инфраструктуру. Именно такую модель вычислений реализует сеть вычислительных мощностей (CPN, аббр. от англ. Computing Power Network) – сетевая структура, предназначенная для распределения, управления и оптимального использования вычислительных ресурсов по аналогии с распределением электрической энергии в энергосистемах. Актуальность концепции CPN обусловлена необходимостью обеспечения устойчивости, масштабируемости и энергоэффективности современных информационных систем, а также ростом популярности таких моделей вычисления, как периферийные (граничные), туманные и облачные. Кроме того, появление и активное развитие ИИ /машинного обучения, интернета вещей, больших данных, систем дополненной реальности создает дополнительную нагрузку на вычислительную инфраструктуру, что усиливает потребность в эффективных механизмах управления распределенными вычислениями. В этой связи концепция CPN открывает новые горизонты в построении гибких, самоорганизующихся и энергооптимизированных вычислительных мощностей, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать высокую производительность в условиях ограниченных ресурсов.

В принципе сама идея интеграции вычислительных и сетевых ресурсов, лежащая в основе концепции CPN, не совсем новая – она тесно связана с устоявшейся парадигмой сетевых вычислений (Grid Computing) [2] и другими соответствующими технологиями, такими как общедоступные вычисления (Utility Computing), кластерные вычисления и распределенные вычислительные системы в целом [3]. Еще в начале 2010-х гг. с развитием облачных технологий и сетевой виртуализации было предложено использовать сервисно-ориентированную архитектуру (SOA, аббр. от англ. Service-Oriented Architecture) для предоставления комбинированных облачно-сетевых услуг [4]. В дальнейшем этот подход нашел свое практическое воплощение в стандартизированной архитектуре CPN.

Проведенный анализ печатных публикаций и интернет-источников показал относительно небольшое число работ по тематике CPN и аналогичным концепциям [5–15] и практически полное отсутствие русскоязычных материалов. Лишь в работах Р.Л. Смелянского [2, 16, 17] предложена распределенная вычислительная архитектура под названием Network Powered by Computing (NPC), которая во многом совпадает с принципами реализации CPN. Поэтому целью статьи является всестороннее

рассмотрение основных положений CPN как перспективной модели организации распределенных вычислений. Представлены базовые принципы и структура CPN, ее архитектурные и функциональные особенности, состояние стандартизации, а также возможные сценарии применения в контексте современных требований к вычислительным системам.

Эволюция распределенных вычислений

Технологии распределенных вычислений за последние два десятилетия прошли значительную эволюцию, начиная с классического облачного подхода и заканчивая современными концепциями, такими как периферийные (граничные) вычисления и CPN. Каждая из этих технологий имеет свои уникальные преимущества, но также имеет определенные ограничения, которые и определяют области их эффективного применения.

Технология облачных вычислений (Cloud Computing) [18] стала фундаментом для многих современных IT-решений. Ее основная идея заключается в предоставлении вычислительных ресурсов через удаленные дата-центры, что позволяет пользователям облачных услуг масштабировать необходимые вычислительные мощности и мощности хранения данных без необходимости содержания собственной инфраструктуры. Однако у этого подхода есть существенный недостаток – высокая задержка из-за необходимости передачи данных между пользователем и облачным центром.

С развитием интернета вещей (IoT, *аббр. от англ. Internet of Things*) [19] появилась технология периферийных (граничных) (Edge Computing) и туманных вычислений (Fog Computing) [18]. В отличие от облачных вычислений, в них вычислительные ресурсы перемещаются ближе к пользователю, на границу сети, что значительно сокращает задержку. Это особенно важно для таких сценариев, как умные города или промышленный IoT, где датчики и устройства должны обрабатывать данные в реальном времени. Однако периферийные вычисления сталкиваются с проблемой «эффекта островов» – разрозненности ресурсов, что ограничивает вычислительную мощность и координацию между периферийными узлами.

Самой современной разработкой в этой области является CPN, идея которой была предложена в 2019 г. [5]. Сеть представляет собой качественно новый подход, объединяющий распределенные вычислительные ресурсы в единую сеть с возможностью их динамической координации. Это достигается за счет технологии маршрутизации вычислительных мощностей, которая позволяет оптимально распределять задачи между вычислительными узлами. В результате CPN обеспечивает

ультранизкую задержку и высокую вычислительную мощность, что делает ее идеальным решением для таких передовых областей, как интернет транспортных средств (IoV, *аббр. от англ. Internet of Vehicles*). Однако внедрение CPN требует значительных инвестиций в модернизацию сетевого оборудования, что пока сдерживает ее широкое распространение. Сравнение различных вычислительных парадигм приведено в таблице 1 [8].

ТАБЛИЦА 1. Характеристики различных вычислительных парадигм

TABLE 1. Characteristics of Different Computing Paradigms

| Характеристика | Облачные вычисления | Периферийные (граничные) вычисления | Сеть вычислительных мощностей CPN |
|--------------------------------|---|--|--|
| Год предложения | 2006 | 2014 | 2019 |
| Основная идея | Предоставление вычислительных услуг из облачного центра | Размещение вычислительных ресурсов на границе сети | Соединение и координация распределенных вычислительных ресурсов через сеть |
| Сотрудничество между узлами | Нет | Нет | Да |
| Задержка | Высокая | Низкая | Сверхнизкая |
| Вычислительная мощность | Высокая | Ограниченная | Высокая |
| Взаимная осведомленность узлов | Нет | Ограниченная | Высокая |
| Ключевые технологии | Виртуализация | Выгрузка вычислений | Маршрутизация вычислительной мощности |
| Сценарии применения | Облачные вычислительные платформы | IoT | IoV |
| Недостатки | Сеть – узкое место | Эффект изолированности вычислительной мощности | Высокая стоимость модернизации сетевого оборудования |

Таким образом, каждая из этих технологий занимает свою нишу в современной IT-инфраструктуре. Облачные вычисления остаются универсальным инструментом для многих задач, периферийные (граничные) вычисления обеспечивают эффективные решения для IoT, а CPN открывает новые горизонты для приложений, требующих максимальной скорости передачи и обработки данных и координации вычислительных ресурсов. Эволюция от централизованных облачных систем к распределенным интеллектуальным вычислительным сетям отражает растущие потребности цифровой экономики и технологический прогресс в области вычислений.

Базовые принципы CPN

Концепция CPN основывается на аналогии между распределением вычислительных ресурсов и электрической энергии в энергосистемах. Основопологающей идеей CPN является представление вычислительных мощностей как «вычислительной энергии», которая может передаваться, накапливаться и потребляться в распределенной сети узлов – аналогично тому, как электрическая энергия распределяется между генераторами, подстанциями и потребителями в энергосетях.

Первоначально концепцию CPN предложила китайская компания Huawei [5] как часть своего видения развития вычислительной инфраструктуры и сетей, подкрепляемое конкретными технологическими решениями и фирменными продуктами.

Цель CPN – создать интеллектуальную интегрированную систему вычислений и сетей, которая управляет и распределяет вычислительные ресурсы («Compute Power») так же легко и эффективно, как традиционные сети связи распределяют пакеты данных. Это позволит предоставить пользователям гибкие и масштабируемые ресурсы для выполнения вычислительных задач, оптимизируя использование имеющихся вычислительных мощностей. Основная идея CPN позиционируется как сеть для интеллектуальной эпохи, где спрос на распределенные вычисления (особенно с развитием ИИ и IoT) будет колоссальным. Ее ключевая задача – глобально объединить разрозненные вычислительные ресурсы (в облаках, на границе сети, в дата-центрах) в единый, легко управляемый и доступный «пул» вычислений. Сеть при этом играет роль не просто транспортной «трубы», а интеллектуальной системы распределения и оркестрации, которая динамически направляет задачи к лучшим доступным вычислительным ресурсам на основе их загруженности, стоимости, задержки и энергопотребления.

CPN охватывает распределение, управление и оптимизацию вычислительных ресурсов в рамках единой сетевой инфраструктуры. Эта сеть позволяет интегрировать различные вычислительные ресурсы (серверы, хранилища данных, вычислительные платформы и др.) и устройства передачи данных (коммутаторы, маршрутизаторы, каналы связи) в единую сеть для предоставления вычислительных мощностей по запросу пользователей услуг CPN, обеспечивая более эффективную эксплуатацию ресурсов и поддержку разнообразных приложений, от облачных и туманных вычислений до IoT.

CPN обеспечивает совместное планирование вычислительных и сетевых ресурсов, направляя задачи различных приложений на оптимальные вычислительные узлы по наиболее подходящим

маршрутам. По мере развития прикладных сценариев особенно важным критерием становится своевременность – один из основных параметров качества обслуживания (QoS, аббр. от англ. Quality of Service). В условиях появления задач, требующих высокой вычислительной мощности и обладающих строгими временными ограничениями, критически важными становятся как высокая производительность, так и гарантированная низкая задержка передачи. В этом контексте детерминированные сети [20] представляют собой перспективный путь, обеспечивая стабильные и надежные каналы связи, а также поддержку междоменных сценариев планирования вычислительных задач и передачи данных.

Один из главных принципов CPN – децентрализованное управление ресурсами. Вместо централизованного диспетчерского контроля распределение задач и ресурсов осуществляется на основе самоорганизующихся механизмов, при которых каждый узел в сети способен самостоятельно оценивать свою нагрузку, принимать решения о передаче или приеме задач и участвовать в глобальном балансе нагрузки. Это позволяет достичь высокой адаптивности и масштабируемости системы.

Другим важным принципом является адаптивное и динамическое распределение вычислительных мощностей. Используемые в CPN интеллектуальные алгоритмы, включая методы предиктивной аналитики и машинного обучения, позволяют прогнозировать нагрузку, определять приоритеты задач и оптимально перераспределять ресурсы в реальном времени. В отличие от традиционных подходов, где ресурсы статически закрепляются за задачами или узлами, CPN обеспечивает гибкое перераспределение в зависимости от текущего состояния системы и сетевых условий.

CPN также реализует принцип энергоэффективности. Путем мониторинга использования ресурсов и динамического масштабирования вычислений (например, временного отключения или переключения узлов при снижении нагрузки) достигается минимизация энергопотребления при сохранении требуемого уровня производительности.

Дополнительным принципом является интеграция разнородных вычислительных сред – от мощных облачных дата-центров до периферийных и мобильных устройств. CPN обеспечивает унифицированное управление такими гетерогенными компонентами, абстрагируя различия в архитектуре, пропускной способности и вычислительном потенциале за счет стандартизированного протокола обмена данными и механизмов виртуализации ресурсов.

Наконец, важным аспектом является обеспечение QoS и устойчивости системы. В рамках CPN реализуются приоритетные очереди обработки, допускается избыточность выполнения критических

задач, а также поддерживается автоматическое восстановление после отказов отдельных узлов. Все эти механизмы направлены на обеспечение непрерывности вычислительного процесса в условиях ограниченных и нестабильных ресурсов.

Таким образом, можно отметить следующие преимущества CPN по сравнению с облачными и периферийными (граничными) вычислениями:

- масштабируемость (легкость в добавлении новых ресурсов по мере роста потребностей);
- гибкость (возможность быстро адаптироваться к изменениям в требованиях к вычислительным мощностям);
- экономия затрат (оптимизация использования вычислительных ресурсов может привести к снижению затрат на инфраструктуру);
- устойчивость (возможность распределения нагрузки и резервирования ресурсов повышает надежность вычислительной системы).

Структура CPN

CPN представляет собой сложную распределенную систему, архитектура которой строится на трех фундаментальных компонентах, каждый из которых выполняет критически важные функции для обеспечения эффективной работы всей инфраструктуры [1].

Первым и главным компонентом CPN являются вычислительные узлы, которые образуют физическую основу и представляют собой разнородные вычислительные устройства, распределенные географически. В их состав входят не только традиционные серверные фермы и дата-центры, но и периферийные вычислительные устройства, включая оборудование базовых станций мобильных сетей, промышленные серверы и даже пользовательские устройства с избыточными вычислительными ресурсами. CPN-узлы поддерживают многоуровневую виртуализацию ресурсов, позволяя одновременно работать виртуальным машинам, контейнерам. Каждый узел оснащается специализированным программным обеспечением, которое обеспечивает интеграцию в общую сеть, предоставляя информацию о доступных ресурсах (процессорных мощностях, объемах памяти, хранилищах данных, специализированных ускорителях типа GPU или TPU), текущей загрузке и поддерживаемых сервисах. Особенностью CPN-узлов является их способность динамически формировать пулы ресурсов, где физическое расположение оборудования становится прозрачным для конечных пользователей. Современные реализации таких узлов включают механизмы аппаратного ускорения для обработки сетевого трафика и специализированные интерфейсы для взаимодействия с оркестраторами ресурсов.

Второй компонент CPN – сетевая инфраструктура, представляет собой многоуровневую систему коммуникаций, обеспечивающую надежную и высокоскоростную связь между распределенными узлами. Она включает как традиционные IP-сети, так и специализированные каналы связи, оптимизированные для передачи больших объемов данных с минимальными задержками. Современные реализации используют технологии программно-конфигурируемых сетей (SDN, *аббр. от англ. Software Defined Networking*) [21], которые позволяют динамически управлять маршрутизацией трафика в зависимости от текущей нагрузки и требований услуг. Особое внимание уделяется качеству обслуживания трафика – сетевые компоненты CPN поддерживают механизмы приоритезации трафика, резервирования полосы пропускания и гарантированной задержки. Это реализуется с использованием технологии сетей, чувствительных ко времени (TSN, *аббр. от англ. Time Sensitive Networking*), обеспечивающих гарантированные задержку и надежность доставки информации [22]. В сетевой инфраструктуре CPN применяются инновационные подходы к маршрутизации, учитывающие не только топологию сети, но и доступность вычислительных ресурсов в различных точках присутствия. Для глобальных CPN критически важным становится взаимодействие между сетями разных операторов, что требует реализации стандартизированных интерфейсов и протоколов обмена информацией о доступных ресурсах. Развитие технологий мобильных сетей поколения 5G и перспективных сетей 6G открывает новые возможности для интеграции мобильных устройств в CPN, создавая единое пространство распределенных вычислений.

Третий компонент – управляющие системы, являются «мозгом» CPN, обеспечивающим координацию всех компонентов и предоставление услуг конечным пользователям. Эти системы построены по распределенной архитектуре и включают несколько функциональных уровней. Базовый уровень отвечает за обнаружение и каталогизацию доступных ресурсов, собирая информацию со всех узлов сети в реальном времени. Над ним работает планировщик задач, который принимает решения о размещении рабочих нагрузок с учетом множества факторов: географической близости к источнику данных, требований к задержкам, стоимости использования ресурсов и специальных требований к оборудованию. Современные системы управления CPN применяют методы машинного обучения для прогнозирования нагрузки и превентивного перераспределения ресурсов. Отдельный комплекс компонентов отвечает за безопасность – включая аутентификацию и авторизацию пользователей, шифрование данных, контроль целостности и защиту от DDoS-атак. Важной особенностью

управляющих систем CPN является поддержка мультиарендности, позволяющая одновременно обслуживать множество независимых пользователей с гарантией изоляции их данных и процессов. Перспективным направлением развития технологии CPN является увеличение ее автономности, где рутинные операции распределения вычислительных ресурсов делегируются интеллектуальным алгоритмам, а человеческие ресурсы задействуются только в исключительных ситуациях.

Структура CPN определена в Рекомендации МСЭ-Т Y.2501 [1] и включает в себя потребителя услуг, провайдера услуг, платформу транзакций, плоскость управления, оператора сети связи, платформу на базе ИИ (рисунок 2).



Рис. 2. Структура сети вычислительных мощностей (источник: МСЭ-Т)

Fig. 2. Computing Power Network Framework (Source: ITU-T)

Структура CPN построена с учетом взаимодействия различных участников и элементов, обеспечивающих эффективное распределение и использование вычислительных и сетевых ресурсов. Ключевыми участниками в этой архитектуре выступают потребители услуг, поставщики вычислительной мощности, операторы сетей связи, а также управляющие и транзакционные платформы.

Потребитель услуг CPN – это как физические, так и юридические лица, использующие вычислительные и сетевые ресурсы для реализации собственных сервисов и приложений. Они могут предъявлять различные требования, в зависимости от специфики их задач: кому-то важна высокая производительность, другим – минимальная стоимость или строгие требования к безопасности.

Поставщиком (провайдером) услуг CPN являются организации или физические лица, предоставляющие свои вычислительные ресурсы (вычислительные узлы, хранилища данных, мощности для обработки задач) в рамках распределенной сети. Сетевое взаимодействие и передачу данных между узлами обеспечивают операторы связи, выступающие в роли провайдеров сетевой инфра-

структуры. Их вычислительные ресурсы могут представлять собой как небольшие периферийные узлы, так и более масштабные облачные центры обработки данных, либо даже суперкомпьютерные комплексы. Таким образом, к поставщикам услуг CPN могут относиться телекоммуникационные операторы, крупные облачные платформы, малые и средние предприятия, научные центры или отдельные пользователи, обладающие вычислительными мощностями.

Платформа транзакций в CPN служит посредником между потребителями и поставщиками вычислительных ресурсов. Она обеспечивает процесс обмена ресурсами, который может осуществляться как в открытом, так и в анонимном режиме. В первом случае потребители точно знают, от какого поставщика поступают вычислительные ресурсы. Во втором – данные о поставщике скрыты, а ответственность за безопасность вычислений и корректность транзакции лежит на самой платформе. При этом платформа должна учитывать не только характеристики вычислительных ресурсов, но и сетевые параметры, обеспечивая согласованное распределение ресурсов в соответствии с географическим расположением и техническими требованиями к обслуживанию.

Плоскость управления CPN играет ключевую роль в сборе и агрегации информации о доступных ресурсах. Она фиксирует данные о вычислительной мощности, сетевых характеристиках и текущем состоянии инфраструктуры, передает эту информацию на транзакционную платформу, где она используется для подбора оптимального ресурса. Благодаря этому потребители CPN получают возможность выбирать ресурсы, которые наилучшим образом соответствуют их требованиям по задержке, пропускной способности или стоимости, и подключаться к ним наиболее рациональным способом.

Сетевой оператор в архитектуре CPN выполняет функции по предоставлению соединений между пользователями и вычислительными ресурсами. Он может варьировать качество и уровень сетевого обслуживания в зависимости от требований потребителя. Такой оператор обеспечивает гибкость сети, позволяя формировать маршруты с заданными параметрами QoS, что особенно критично для приложений с временной чувствительностью.

Платформа с поддержкой искусственного интеллекта – дополнительный модуль в архитектуре CPN. Она предоставляет интеллектуальные сервисы потребителям, например, автоматическую адаптацию вычислительной мощности под текущую нагрузку, а также может помогать поставщикам услуг CPN в оптимизации распределения ресурсов или прогнозировании спроса.

Функциональная архитектура CPN

Функциональная архитектура CPN (рисунок 3) приведена в Рекомендации МСЭ-Т Y.2501 [1] и представляет собой многоуровневую систему, в которой каждый уровень выполняет специфические функции, обеспечивая целостную работу распределенной вычислительной сети. Такая структура позволяет достичь модульности, гибкости, масштабируемости и высокой степени адаптации к различным условиям эксплуатации. Всего в архитектуре CPN выделяют четыре ключевых уровня: услуг, управления, ресурсов, а также оркестровки и эксплуатационного управления. Их взаимодействие обеспечивает реализацию ключевых функций системы: от динамического планирования вычислительных ресурсов до обеспечения устойчивого и масштабируемого соединения между пользователями и вычислительными узлами.

Верхним является уровень услуг CPN, который выполняет роль внешнего интерфейса между системой и ее пользователями – как частными, так и корпоративными. Через этот уровень осуществляется подача запросов на вычисления, формулировка требований к QoS и безопасности, а также определение параметров соглашения о QoS (SLA, аббр. от англ. Service Level Agreement). Здесь также реализуются функции учета, тарификации, мониторинга и отчетности. Уровень услуг позволяет пользователям взаимодействовать с CPN через удобные интерфейсы, не вдаваясь в технические подробности функционирования внутренней инфраструктуры.

Следующим является уровень управления CPN, выполняющий функции интеллектуального центра системы. Здесь происходит обработка поступающих

с уровня услуг запросов, трансляция пользовательских требований в технические параметры, планирование распределения ресурсов, а также принятие решений о маршрутизации задач, приоритизации вычислений и контроле соблюдения SLA. Уровень управления использует алгоритмы оптимизации и предиктивной аналитики, позволяющие адаптивно реагировать на изменение нагрузки, прогнозировать пиковые состояния и эффективно перераспределять ресурсы между узлами сети. Он обеспечивает системную согласованность между потребностями пользователей и возможностями вычислительной инфраструктуры.

Уровень ресурсов в архитектуре CPN представляет собой основу, на которой размещаются все вычислительные и сетевые ресурсы, предоставляемые различными участниками экосистемы – от поставщиков вычислительной мощности до сетевых операторов. Именно на этом уровне сосредоточены ключевые компоненты инфраструктуры, включая облачные платформы, вычислительные узлы, пограничные (Edge) системы и другие элементы, обеспечивающие выполнение вычислительных задач и передачу данных; используются соответствующие вычислительные ресурсы, такие как серверы различной производительности и назначения, сетевые компоненты, включая коммутаторы, маршрутизаторы и другое сетевое оборудование для маршрутизации трафика, а также локальные и распределенные ресурсы хранения данных. Кроме того, сюда входят предварительно развернутые сервисы и приложения, работающие на вычислительных узлах и обеспечивающие выполнение задач пользователей.

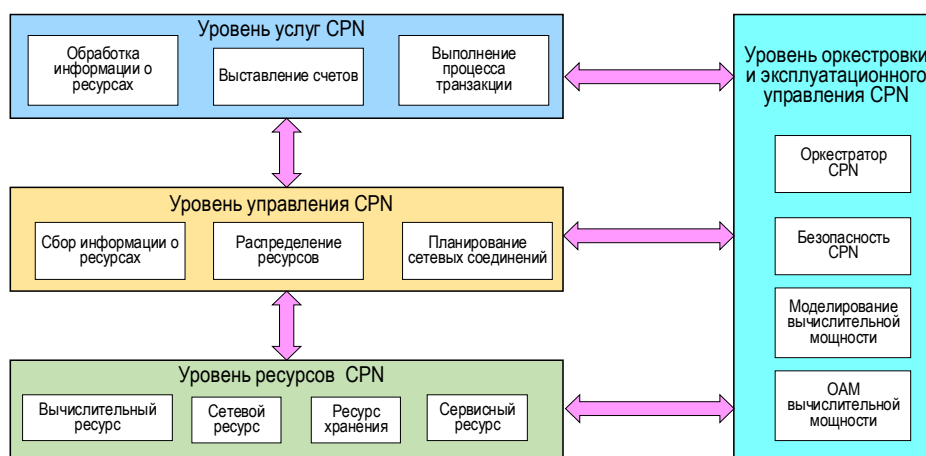


Рис. 3. Функциональная архитектура CPN (источник: МСЭ-Т)

Fig. 3. CPN Functional Architecture (Source: ITU-T)

Связующим звеном между логикой управления и физической реализацией служит уровень оркестровки и эксплуатационного управления CPN. Его назначение связано с технической координацией

всех процессов внутри системы. На этом уровне осуществляется развертывание вычислительных задач, масштабирование, конфигурирование ре-

сурсов, управление жизненным циклом контейнеров и виртуальных машин, обеспечение отказоустойчивости, безопасности и контроля доступа. Оркестрация обеспечивает выполнение стратегических решений, принятых на уровне управления, и гарантирует стабильную, синхронизированную работу всех компонентов сети. Также сюда входят функции автоматического восстановления, мониторинга состояния компонентов, логирования событий и централизованного управления обновлениями и политиками.

В совокупности все четыре уровня обеспечивают полнофункциональную работу CPN как единой, согласованной системы, способной адаптироваться к изменяющимся условиям, рационально распределять ресурсы и обеспечивать заданный уровень обслуживания даже в условиях высокой нагрузки или ограниченной инфраструктуры. Взаимодействие между уровнями организовано по принципу нисходящей и восходящей передачи информации: от пользовательского запроса через планирование и оркестрацию – к физическому выполнению задачи, и далее – к возврату результатов и аналитических данных в управляющие модули системы.

Принципы работы CPN

Для технической реализации CPN предполагается использовать [6]:

- концепт IPv6+, который предоставляет расширенные возможности для интеллектуального управления сетью, гарантированной полосы пропускания и задержки (например, с помощью технологий сегментной маршрутизации SRv6, сетевого программирования Network Programming и др.);
- единый протокол для описания и запроса вычислительных ресурсов;
- глобальный «мозг» (система управления и оркестрации), который имеет полное представление обо всех сетевых и вычислительных ресурсах.

Рассмотрим принципы работы CPN на примере ее реализации с использованием трех ключевых компонент: платформы транзакций CPN, контроллера CPN и шлюзов CPN (рисунок 4) [7]. Платформа транзакций находится на уровне услуг в архитектуре CPN (см. рисунок 3) и реализует процесс транзакции (выделения) необходимой вычислительной мощности.

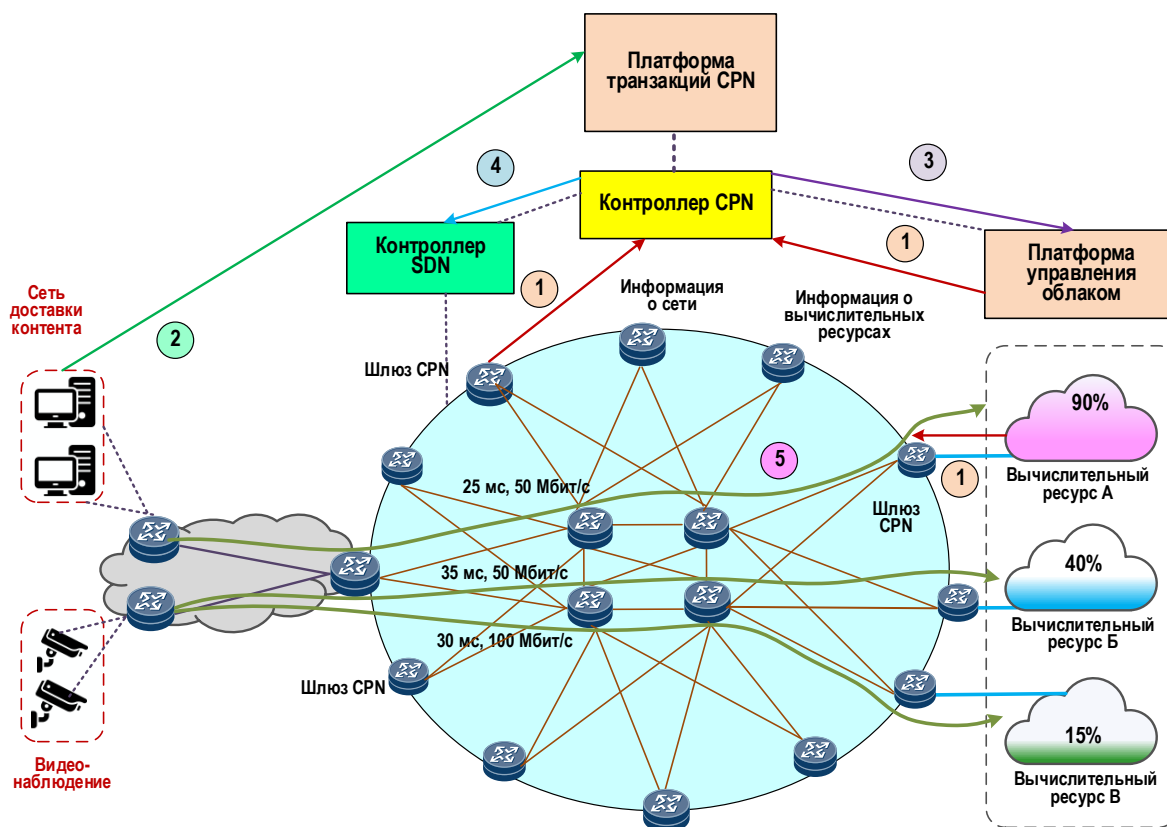


Рис. 4. Этапы реализации услуг CPN
Fig. 4. Stages of CPN Service Implementation

Контроллер CPN реализует функции уровня управления CPN и выполняет сбор, анализ и обработку информации о вычислительных мощностях

и сетевой инфраструктуре. В данном решении контроллер CPN взаимодействует с платформами управления облаком и сетью на базе контроллера

SDN. Взаимодействие контроллеров CPN и SDN происходит через прикладные программные интерфейсы (API, аббр. от англ. Application Programming Interface) и протоколы, позволяющие контроллеру CPN координировать сетевые и вычислительные ресурсы. Так, через северный API SDN-контроллер предоставляет REST API для контроллера CPN, позволяя запрашивать сетевые изменения на основе вычислительной нагрузки (например, перенаправление трафика к граничным серверам), а через южный интерфейс программировать сетевые устройства, интегрированные с CPN-ресурсами (например, маршрутизация трафика к вычислительным узлам) с использованием протоколов OpenFlow или P4. Шлюз CPN размещается на выходе из пула вычислительных ресурсов для реализации обмена и распределения информации о ресурсах вычислительной мощности, формирования отчетов и взаимодействия с платформой транзакций и контроллером для завершения всего процесса предоставления услуг CPN. Шлюз CPN может в различной степени разгружать функции платформы управления облаком и платформы управления сетью в зависимости от используемого решения.

Процесс функционирования рассматриваемой CPN включает пять этапов (обозначены стрелками с цифрами на рисунок 4) [10].

Этап 1. Пулы вычислительных ресурсов (например, дата-центры) регулярно отправляют информацию о наличии доступных ресурсов на шлюзы вычислительной мощности. Контроллер CPN собирает глобальную информацию о вычислительных ресурсах (типы процессоров, их производительность, емкость хранилищ и др.) со шлюзов через платформу управления облаком, а информацию о сетевых ресурсах (связность узлов, пропускная способность каналов, задержки между узлами и др.) – с сетевых узлов через контроллер SDN, а затем после обработки отправляет ее на платформу транзакций CPN.

Этап 2. Пользователи услуг CPN отправляют запросы на требуемые вычислительные ресурсы на платформу транзакций CPN, и выбирают сами, или платформа транзакций рекомендует подходящие ресурсы в соответствии с их потребностями. Платформа анализирует, какие ресурсы нужны, насколько важна скорость передачи информации и сколько данных потребует передать. Исходя из этого, она автоматически подбирает лучшие вычислительные и сетевые ресурсы. Например, если нужно минимизировать задержки, платформа транзакций CPN выберет ближайший и менее загруженный узел с быстрым соединением. Если важна большая пропускная способность, она выберет более широкополосный канал, даже если он находится дальше.

Этап 3. В зависимости от статуса транзакции между пользователем и поставщиками услуг CPN на платформе транзакций, контроллер CPN отправляет соответствующую стратегию распределения вычислительных средств каждому пулу ресурсов, например, уведомляет поставщиков о том, сколько и каких вычислительных мощностей будет занято в течение определенного периода времени, при этом одновременно обновляются данные о ресурсах, зарегистрированных платформой транзакций CPN.

Этап 4. В соответствии с распределением сетевых ресурсов платформа управления сетью (контроллер SDN) получает требования к сетевому соединению, такие как тип соединения, которое необходимо установить, и параметры качества обслуживания трафика QoS. На основе этих требований устанавливаются соответствующие соединения в телекоммуникационной сети для реализации услуги CPN.

Этап 5. Реализация бизнес-услуги CPN для пользователя.

В результате выполнения всех этапов пользователь получает доступ к выбранным вычислительным ресурсам для решения собственных задач. Таким образом, CPN обеспечивает в реальном времени выбор оптимальных вычислительных мощностей и маршрутов передачи данных в зависимости от текущей загрузки вычислительных ресурсов, полосы пропускания и задержки в сети связи и требований пользователя.

Данный подход к предоставлению услуг CPN вполне реализуем на существующих облачных платформах. Для этого нужно только обеспечить работу и взаимодействие различных систем управления – например, объединить управление облаком и сетью. В рассмотренной архитектуре шлюз вычислительной мощности в основном собирает и передает информацию, но в будущем его можно сделать более автономным, чтобы он мог самостоятельно выполнять часть функций управления CPN.

В CPN важную роль играет метод оценки возможностей вычислительных ресурсов. С одной стороны, однотипные вычислительные ресурсы должны быть унифицированы в одной единице измерения. С другой стороны, для комплексного отражения возможностей поддержки услуг CPN могут использоваться определенные значения интегрированных индексов. Рассмотрим пример, иллюстрирующий, как строится модель вычислительных ресурсов и как поддерживается генерация таблицы маршрутизации [23]. Как показано на рисунке 5, существуют два пула вычислительных ресурсов, предоставляющих услуги CPN, и пользователь получает доступ к услуге через маршрутизатор R1.

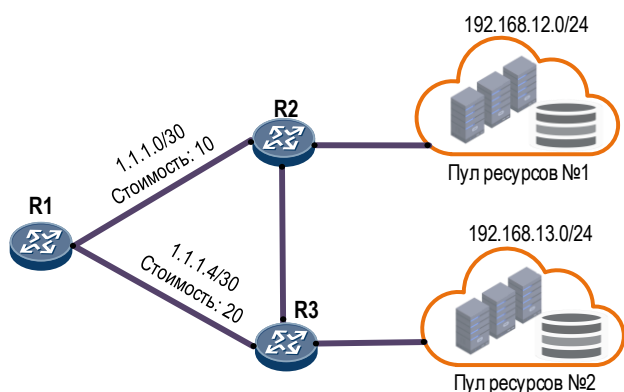


Рис. 5. Пример сетевой топологии CPN

Fig. 5. An Example CPN Network Topology

Традиционно следующий узел в IP-сети выбирается в соответствии с имеющимися сетевыми ресурсами путем анализа таблицы маршрутизации, которая для маршрутизатора R1 показана в таблице 2. В ней переход к узлу R3 имеет большую сетевую стоимость, которая может учитывать доступную полосу пропускания, задержку и другие характеристики IP-сети, поэтому трафик будет направлен к этому узлу.

В сети CPN шлюз вычислительной мощности получает информацию о доступных вычислительных ресурсах, таких как мощность центрального процессора (например, 2,4 ГГц), мощность графического процессора (например, 100 терафлопс), объем оперативной памяти (например, 256 Гбайт) и др. На основе полученной информации оценивается загрузка центрального процессора (например, 40 %), загрузка графического процессора (например, 60 %), загрузка оперативной памяти (например, 35 %) и другие факторы. Интегральный параметр в виде стоимости вычислительной мощности записывается в таблице маршрутизации, которая для R1 представлена в таблице 3.

Так как требуемая услуга CPN может быть реализована в обоих пулах вычислительных ресурсов, узел R1 анализирует стоимость вычислительной мощности и сетевую стоимость для выбора подходящего следующего перехода. В рассматриваемом примере сетевая стоимость у переходов одинаковая, поэтому с точки зрения стоимости вычислительной мощности узел R2 более эффективен. Следовательно, трафик пользователя будет направлен на R2 для доступа к требуемой вычислительной услуге.

ТАБЛИЦА 2. Таблица маршрутизации R1

TABLE 2. Routing Table of R1

| IP-адрес назначения | Протокол | Приоритет | Сетевая стоимость | Флаг | Следующий переход | Интерфейс |
|---------------------|----------|-----------|-------------------|------|-------------------|-----------|
| 192.168.12.0/24 | IS-IS | 15 | 10 | D | 1.1.1.2 | GE0/0/1 |
| 192.168.13.0/24 | IS-IS | 15 | 20 | D | 1.1.1.6 | GE0/0/2 |

ТАБЛИЦА 3. Таблица маршрутизации R1, включающая параметр вычислительной мощности

TABLE 3. Routing Table of R1 Including Computing Power Parameter

| IP-адрес назначения | Протокол | Приоритет | Стоимость вычислительной мощности | Сетевая стоимость | Флаг | Следующий переход | Интерфейс |
|---------------------|----------|-----------|-----------------------------------|-------------------|------|-------------------|-----------|
| 192.168.12.0/24 | IS-IS | 15 | 10 | 10 | D | 1.1.1.2 | GE0/0/1 |
| 192.168.13.0/24 | IS-IS | 15 | 20 | 10 | D | 1.1.1.6 | GE0/0/2 |

Стандартизация CPN

Концепция CPN находится на стыке нескольких областей и ее стандартизацией занимается не один орган, а скорее экосистема организаций, каждая из которых работает над стандартизацией ключевых компонентов этой концепции. Ключевую координирующую роль в этом процессе играет Китай, в частности через национальную ассоциацию телекоммуникационных стандартов (CCSA, аббр. от англ. China Communications Standards Association) и Международный союз электросвязи (МСЭ), при активном лидерстве компании Huawei. На текущем этапе можно наблюдать первоначальное формирование нормативной базы, которая должна обеспечить совместимость и эффективное функционирование этой перспективной технологии в глобальном масштабе.

Первоначально в 2019 г. в Инженерном совете Интернета IETF была создана исследовательская группа COINRG (COmputing In Network Research Group), работа которой посвящена изучению глубокой интеграции вычислений и сетей. В документах группы используется термин «вычисления в сети» (Computing in the Network), который означает, что сетевые инфраструктуры будут не только пересылать данные, но и иметь возможности вычислений. Рабочая группа подготовила несколько проектов документов (таблица 4), в которых определяется терминология в области CPN, направления дальнейших исследований, варианты практического применения.

ТАБЛИЦА 4. Документы исследовательской группы COINRG IETF

TABLE 4. COINRG IETF Study Group Documents

| Год | Название документа | Статус документа |
|------|--|------------------------------|
| 2024 | Варианты использования вычислений в сети | Активный интернет-проект |
| | Анализ вариантов использования вычислений в сети | Просроченный интернет-проект |
| 2023 | Направления исследований вычислений в сети | Просроченный интернет-проект |
| | Терминология для вычислений в сети | Просроченный интернет-проект |

Ключевую роль в разработке основополагающих стандартов для CPN играет сектор стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), в рамках которого в 2021 г. была открыта новая серия Рекомендаций Y.25xx, специально посвященная CPN (таблица 5). Начало этому процессу положила рекомендация Y.2501, которая стала первым международным документом, описывающим общую архитектуру вычислительных сетей. В документах МСЭ-Т заложены концептуальные основы и базовые принципы организации CPN, включая структуру, функциональную архитектуру, эталонную модель интерфейсов, требования к системе сигнализации и методы управления распределенными вычислительными ресурсами.

Параллельно с развитием базового стандарта в рамках МСЭ-Т ведется работа над рядом дополнительных рекомендаций, призванных детализировать отдельные аспекты функционирования CPN. В частности, проект Q.CPN фокусируется на архитектуре сигнализации, определяя процедуры управления ресурсами и информационные потоки, необходимые для развертывания сервисов. Другой важный документ – Q.BNG-INC – посвящен стандартизации требований к интеллектуальному управлению пограничными сетевыми шлюзами, что особенно актуально для сценариев, предполагающих взаимодействие между облачными и периферийными вычислительными ресурсами.

Особого внимания заслуживает разрабатываемая рекомендация Y.ASA-CPN, которая вводит стандартизированные подходы к аутентификации и планированию вычислительных ресурсов в распределенных сетях. Этот документ призван решить одну из ключевых проблем CPN – обеспечение доверенного взаимодействия между разнородными узлами сети. В нем рассматриваются механизмы управления ресурсами, методы унифицированного планирования и система идентификации вычислительных мощностей, что имеет принципиальное значение для создания безопасной и надежной инфраструктуры.

ТАБЛИЦА 5. Документы МСЭ-Т по стандартизации CPN

TABLE 5. ITU-T CPN Standardization Documents

| Документ (год) | Название документа | Статус документа |
|---------------------------------|--|---------------------|
| ITU-T Y.2501 (2021) | Сеть вычислительных мощностей – Структура и архитектура | Рекомендация |
| ITU-T Y.2502 (2024) | Сеть вычислительных мощностей – Архитектура аутентификации и оркестровки | Проект рекомендации |
| ITU-T Q.4140 (2023) | Требования к сигнализации для предоставления услуг в CPN | Рекомендация |
| ITU-T Q.4141 (2023) | Требования и сигнализация интеллектуального управления для пограничного сетевого шлюза в CPN | Рекомендация |
| ITU-T Q.4142 (2024) | Архитектура сигнализации для оркестровки услуг в CPN | Рекомендация |
| ITU-T Q.4143 (2024) | Требования к сигнализации для плоскости управления на основе облака и объединенной плоскости пользователя виртуализированного шлюза широкополосной сети (vBNG) | Рекомендация |
| ITU-T Q.4144 (2025) | Требования к сигнализации для межоператорской оркестровки услуг в CPN | Рекомендация |
| ITU-T Q.CPN-TP-SA | Архитектура сигнализации транзакционной платформы CPN | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.NGNe-O CPN-reqts (2025) | Требования и структура усовершенствований оркестровки NGNe для поддержки CPN | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.ASA-CPN (2021) | Архитектура планирования аутентификации в CPN | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.SFO (2021) | Требования и структура оркестровки сервисных функций на основе цепочки сервисных функций | Проект рекомендации |
| ITU-T Q.CPN-GW-IBN (2024) | Сигнализация и процедура интеллектуального управления шлюзом вычислительной мощности в CPN с использованием сети на основе намерений | Проект рекомендации |
| ITU-T Q.CPN-NC-SA (2023) | Архитектура сигнализации функций управления сетью для CPN | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.CPN-CL-Arch (2025) | Требования и архитектура уровня управления CPN для сетевых ресурсов в NGNe | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.CPN-DF (2025) | Сеть вычислительных мощностей – Термины и определения | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.CPN-exp-reqts (2025) | Требования к раскрытию возможностей в CPN | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.CPN-gcpm (2026) | Функциональные требования к моделированию вычислительной мощности в CPN | Проект рекомендации |
| ITU-T Y.CPN-TP-Arch (2026) | Требования и функциональная архитектура платформы транзакций CPN | Проект рекомендации |

Помимо МСЭ-Т, значительный вклад в стандартизацию CPN вносят и другие международные организации. Европейский институт телекоммуникационных стандартов (ETSI) развивает концепцию периферийных (граничных) вычислений в мобильных сетях 4G / 5G с мультимедийным доступом (MEC, аббр. от англ. Multi-access Edge Computing), которая во многом перекликается с идеями CPN, особенно в части распределения вычислительных ресурсов на границе сети. Проблемами совершенствования протоколов маршрутизации и управления ресурсами, которые могут быть адаптированы для нужд вычислительных сетей, занимается Инженерный совет интернета (IETF). Особую активность проявляет консорциум 3GPP, который исследует возможности интеграции CPN с инфраструктурой мобильной связи нового поколения 6G, что открывает перспективы для реализации сценариев с ультранизкой задержкой.

Несмотря на очевидный прогресс в области стандартизации, процесс формирования нормативной базы для CPN сталкивается с рядом существенных вызовов. Одной из основных проблем остается фрагментация инициатив – отсутствие единой согласованной системы стандартов может серьезно затруднить глобальное внедрение технологии. Кроме того, успешная реализация концепции CPN требует беспрецедентного уровня координации между поставщиками сетевых и облачных услуг, что отмечается в рекомендациях МСЭ-Т. Технологическая сложность самой концепции, предполагающей динамическое распределение ресурсов при обеспечении безопасности и совместимости с существующей инфраструктурой, также представляет собой серьезное препятствие для разработчиков стандартов.

Перспективы дальнейшего развития стандартизации CPN связаны с разработкой единого подхода к описанию архитектуры, интерфейсов и протоколов взаимодействия, который бы учитывал как специфику распределенных вычислений, так и требования современных телекоммуникационных сетей. Особое внимание следует уделить вопросам безопасности, управления QoS и механизмам оркестрации ресурсов. Решение этих задач позволит превратить CPN из перспективной концепции в универсальную платформу, способную обеспечить новый уровень эффективности распределенных вычислений.

Таким образом, процесс стандартизации CPN находится на важном этапе своего развития. Уже сейчас можно говорить о формировании концептуальных основ, заложенных в рекомендациях МСЭ-Т, однако предстоит еще значительная работа по созданию комплексной системы стандартов, которая бы охватывала все аспекты функционирования вычислительных сетей. Успех этой работы во многом

будет зависеть от степени координации между международными организациями, производителями оборудования и операторами связи, а также от способности выработать согласованные подходы к решению сложных технологических задач.

Сценарии применения CPN

Сети вычислительных мощностей работают в основном в двух типах сценариев. Первый тип – это сценарии с низкой задержкой, реализуемые с использованием периферийных (граничных) вычислений. В этом случае CPN обеспечивает координацию между вычислительными ресурсами различных периферийных облаков. Второй тип – это сценарии высокой мобильности, в этом случае CPN обеспечивает гибкое планирование для предоставления вычислительных услуг пользователям, перемещающимся по значительной территории, например, «живая» видеотрансляция при путешествиях или коммуникации автомобиля с любыми объектами (V2X, аббр. от англ. Vehicle-to-Everything). Далее приведены примеры таких типовых сценариев использования CPN.

Сценарий переключения периферийных облаков [24]

Для обеспечения низкой задержки при периферийных вычислениях требуется взаимодействие вычислительных и сетевых возможностей. Низкая задержка является одной из наиболее важных характеристик периферийных вычислений, а также ключевым фактором, отличающим их от облачных вычислений. В сценарии периферийных вычислений клиенты остро нуждаются в низкой задержке, высоких вычислительных возможностях и сетевой маршрутизации, которые уже выходят за рамки возможностей традиционных поставщиков облачных услуг. Таким образом, в дополнение к развертыванию вычислительных узлов на границе сети также требуется реконструкция архитектуры базовой сети по принципу «вычислительно-сетевое взаимодействие».

Вычислительная задача, требующая низкой задержки связи, может быть заранее распределена в ближайшее периферийное облако платформой транзакций CPN. Потребителями такого сценария могут быть устройства IoT, пользователи мобильных устройств, беспилотные автомобили и т. д. При нехватке вычислительной мощности периферийного облака шлюзы CPN, подключенные к вычислительному узлу, должны распределять вычислительную мощность между доменами. Процесс переключения периферийных облаков на примере нехватки вычислительной мощности в облаке 1 (рисунки б) включает перечисленные ниже процедуры планирования.

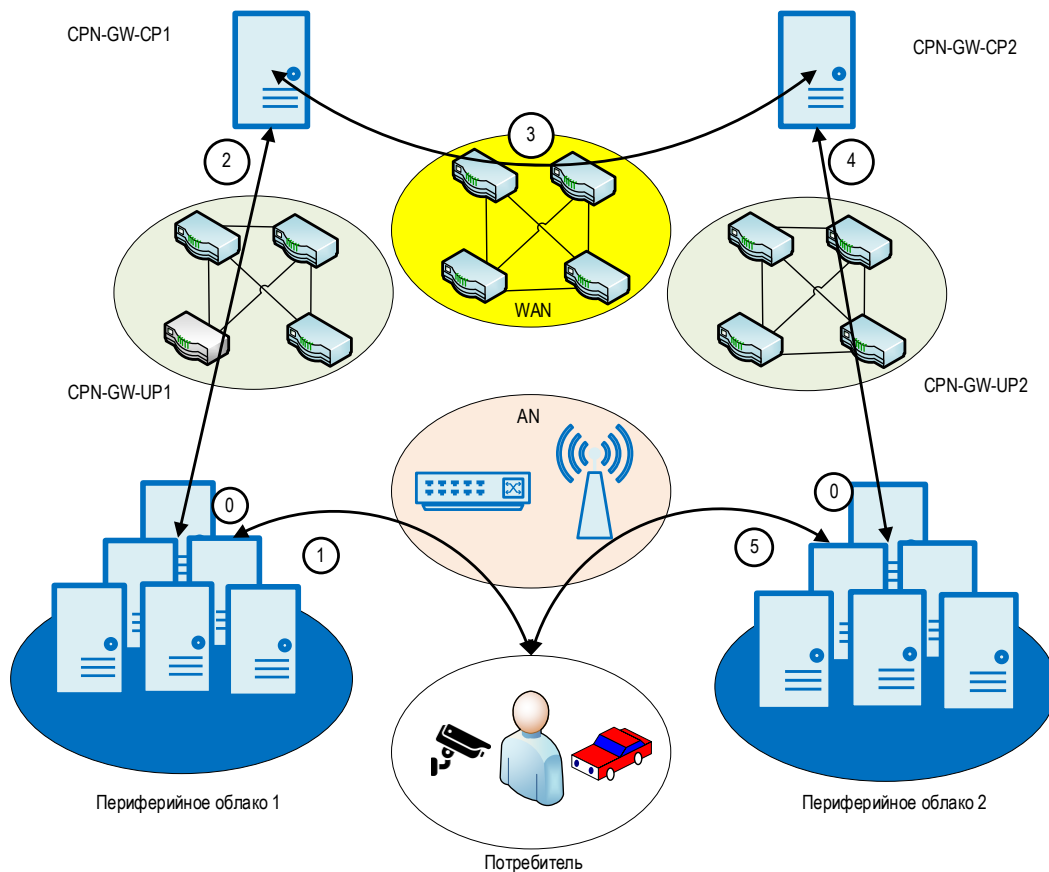


Рис. 6. Сценарий переключения периферийных облаков

Fig. 6. Edge Cloud Switchover Scenario

Процедура 0. Информация о вычислительных ресурсах и производительности сети в периферийном облаке передается в плоскость управления шлюза CPN, а таблица информации о внутридоменных ресурсах поддерживается функцией сбора информации о ресурсах. Соседние шлюзы плоскости управления CPN-GW-CP1 и CPN-GW-CP2 будут обмениваться данными для поддержания таблицы информации о междоменных ресурсах.

Процедуры 1 и 2. Потребители отправляют вычислительную задачу на периферийное облако 1, однако вычислительной мощности в нем недостаточно. Запрос на междоменное планирование вычислительной мощности будет отправлен на подключенный шлюз CPN-GW-CP1.

Процедура 3. В соответствии с таблицей информации о междоменных ресурсах шлюз CPN-GW-CP1 выбирает периферийное облако 2 для выполнения разгрузки вычислений и отправляет к нему вычислительную задачу.

Процедура 4. Шлюз CPN-GW-CP2 обращается к таблице информации о внутридоменных ресурсах и выделяет необходимую вычислительную мощность для задачи. Затем будет установлено сетевое соединение для удовлетворения сетевых требований задачи.

Процедура 5. Потребители будут уведомлены об изменении вычислительного узла и отправят данные на серверы, развернутые в периферийном облаке 2. Вычислительные задачи будут решены и их результаты возвращены потребителям.

Сценарий переключения дата-центров [24].

В сценарии переключения центров обработки данных (рисунок 7), в отличие от сценария переключения узлов периферийных вычислений, плоскость управления сетью разделена на две части. Первая часть – это междоменный контроллер глобальной вычислительной сети WAN, который управляет трафиком между вычислительными доменами. Вторая часть – это внутридоменная плоскость управления шлюзами CPN, которая управляет трафиком внутри домена. Таким образом, в этом сценарии междоменная вычислительная мощность планируется централизованно и реализуется с помощью следующих процедур.

Процедура 0. Плоскость управления шлюза CPN собирает информацию о внутридоменных вычислительных ресурсах и сетевых характеристиках и хранит ее в соответствующей таблице.

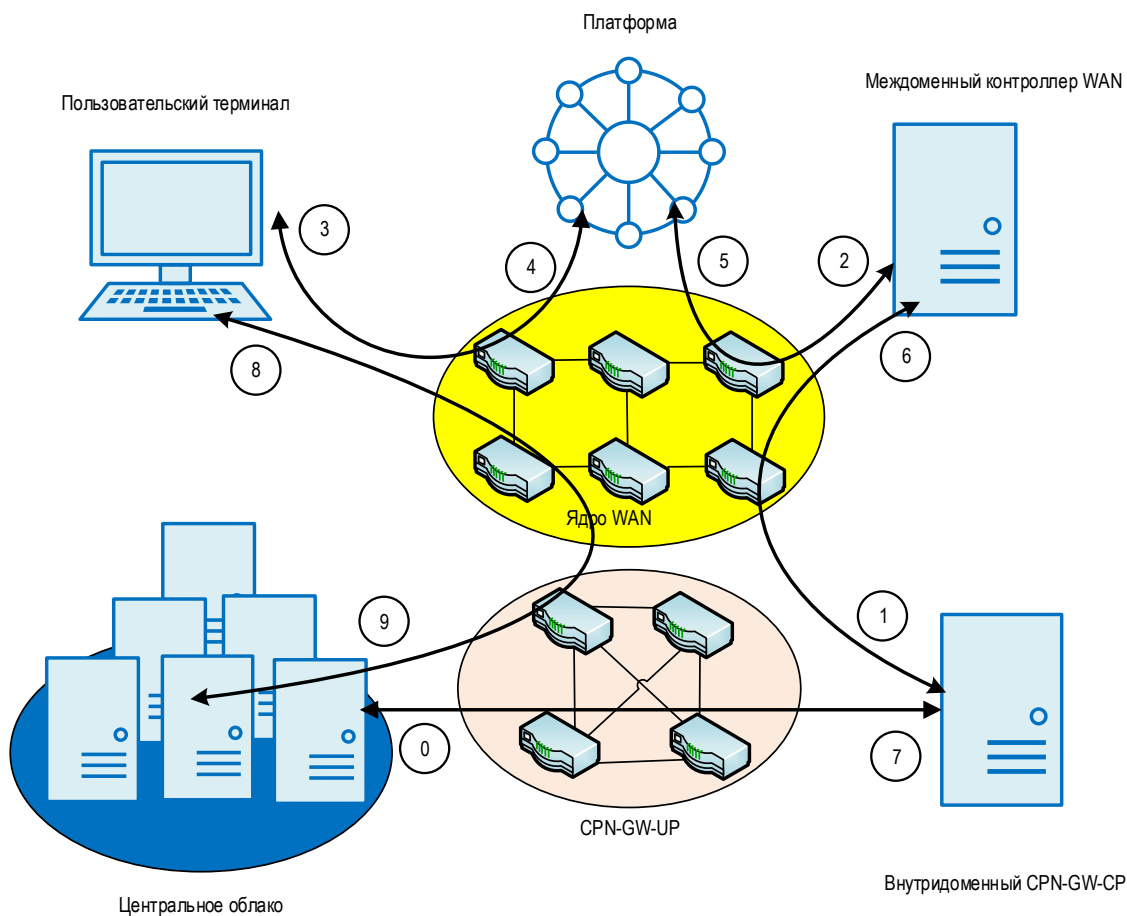


Рис. 7. Сценарий переключения дата-центров
 Fig. 7. Data Centre Interconnect Scenario

Процедура 1. Таблица информации о внутридоменных ресурсах отправляется в междоменный контроллер WAN, который поддерживает таблицу междоменных ресурсов, содержащую данные о вычислительных мощностях и характеристиках сети.

Процедура 2. Таблица информации о междоменных ресурсах отправляется в платформу транзакций CPN, которая интегрирует данные о ресурсах всей сети и формирует соответствующие квоты ресурсов.

Процедуры 3 и 4. Когда пользовательский терминал запрашивает ресурсы для вычислительной задачи, запрос отправляется в платформу. Платформа передает информацию об имеющихся ресурсах пользователю, который выбирает наиболее подходящие и заключают договор транзакции с провайдером услуг CPN.

Процедура 5. Платформа отправляет информацию о транзакции в междоменный контроллер WAN. Контроллер обращается к таблице информации о междоменных ресурсах, выделяет их для транзакции, а затем создает и поддерживает сетевое соединение между пользователем и выбранным центром обработки данных.

Процедура 6. Транзакция доставляется в контроллер внутридоменного шлюза CPN.

Процедура 7. На основе таблицы информации о внутридоменных ресурсах выделяются необходимые ресурсы локально контроллером внутридоменного шлюза CPN, а также устанавливается и поддерживается сетевое соединение между ресурсами и потребителями.

Процедуры 8 и 9. Терминал пользователя отправляет вычислительную задачу серверу, который выполняет ее и возвращает результаты обработки.

Сценарий высокой мобильности [1]

Такие сервисы, как «живая» трансляция при путешествиях и коммуникации автомобиля со всем (V2X), часто отличаются высокой мобильностью пользователя. Так, в примере сценария «живой» трансляции ведущий ведет прямую трансляцию путешествия из города А в город Б и по пути должен демонстрировать окрестности. Услуги «живой» трансляции должны обеспечивать отображение окружающего фона, взаимодействие с аудиторией в режиме реального времени (например, голосовую и видеосвязь, прямой эфир и т. д.). В будущем для «живой» трансляции виртуальной реальности

потребуется более качественная визуализация, бóльшая вычислительная мощность и меньшая задержка. Поскольку местоположение ведущего постоянно меняется, при использовании одних и тех же вычислительных ресурсов это изменение будет увеличиваться, как и физическое расстояние между пользователем и вычислительными ресурсами, что приведет к увеличению задержки. Следовательно, CPN может выбирать соответствующие вычислительные и сетевые ресурсы для пользователей в режиме реального времени на основе местоположения и ресурсных условий, чтобы улучшить взаимодействие с пользователем.

Заключение

Сеть вычислительных мощностей CPN предлагает ряд существенных преимуществ, особенно в условиях стремительного роста потребностей в вычислительных ресурсах. Одним из главных достоинств является высокая гибкость – пользователи могут получать доступ к вычислительной мощности по мере надобности, без необходимости инвестировать в дорогостоящее оборудование. Это снижает барьеры для входа в высокотехнологичные области, такие как ИИ, анализ больших данных. Кроме того, благодаря распределенной архитектуре CPN может повышать устойчивость системы в целом – сбой одного узла не приводит к остановке всей сети, поскольку задачи перераспределяются. В некоторых реализациях используется геораспределенность, что позволяет обрабатывать данные ближе к источнику их возникновения (например, на границе сети), снижая задержки и улучшая производительность.

Еще одним плюсом можно назвать более эффективное использование ресурсов – простаивающие вычислительные мощности (например, в нерабочие часы) могут быть задействованы для решения сторонних задач, что повышает общий КПД всей инфраструктуры. В случаях, когда CPN интегрирована с блокчейном, появляется прозрачная система

учета и мотивации – участники получают вознаграждение за предоставление ресурсов, что стимулирует рост сети и делает ее самоподдерживающейся.

Однако, несмотря на очевидные плюсы, у CPN есть и ряд существенных недостатков. Во-первых, обеспечение безопасности и конфиденциальности данных в распределенной среде представляет собой сложную задачу. Поскольку данные могут обрабатываться на множестве узлов, в том числе на устройствах с непроверенной надежностью, возникает риск утечки или компрометации информации. Во-вторых, проблемы с совместимостью оборудования, программного обеспечения и стандартов взаимодействия между различными узлами могут затруднить интеграцию и снизить эффективность всей системы. Также стоит учитывать, что высокая степень децентрализации может привести к неоптимальной маршрутизации задач, особенно если отсутствует качественная система балансировки нагрузки в сети.

Кроме того, несмотря на потенциальную экономию, реальная стоимость использования CPN может варьироваться в зависимости от доступности ресурсов, сетевых условий и спроса. В сценариях, где требуется гарантированное время отклика или высокая надежность, распределенная сеть может уступать централизованным решениям. Также следует отметить, что для полноценного функционирования CPN требуется развитая сетевая инфраструктура и высокоскоростной интернет, что не всегда возможно в удаленных или слаборазвитых регионах.

Таким образом, CPN представляет собой мощную и перспективную модель распределенных вычислений, способную значительно расширить доступ к ресурсам и повысить эффективность их использования, но при этом требует продуманных решений в сфере безопасности, стандартизации и управления.

Список источников

1. Rec. ITU-T Y.2501. Computing Power Network – framework and architecture. 2021.
2. Смелянский Р.Л. Эволюция вычислительной инфраструктуры // Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2024. № 4. С. 190–233. DOI:10.55959/MSU/01370782152024474190234. EDN:OZHXTV
3. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degrees Compared // Proceedings of the Grid Computing Environment Workshop (Austin, USA, 12–16 November 2008). IEEE, 2008. DOI:10.1109/GCE.2008.4738445
4. Duan Q. Service-Oriented Network Virtualization for Composition of Cloud Computing and Networking // International Journal of Next-Generation Computing. 2011. Vol. 2. Iss. 2. PP. 123–138.
5. Huawei Technology Report. Computing 2030. Tech. Rep., 4. 2023. https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/giv/intelligent_world_2030_en.pdf
6. Lei B., Liu Z., Wang X., Yang M., Chen Y. Computing network: A new multiaccess edge computing // Telecommunications Science. 2019. Vol. 35. Iss. 9. PP. 44–51.
7. Yukun S., Bo L., Junlin L., Haonan H., Xing Z., Jing P. Computing power network: A survey // China Communications. 2024. Vol. 21. Iss. 9. PP. 109–145. DOI:10.23919/JCC.ja.2021-0776
8. Zhao Q., Lei B., Wei M. Survey of computing power network // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. 2022. Vol. 3. Iss. 3. PP. 632–644. DOI:10.52953/BXBJ6384. EDN:WJMMIH

9. Jia Q., Hu Y., Zhou X., Ma Q., Guo K., Zhang H., Xie R., Huang T., Liu Y. Deterministic Computing Power Networking: Architecture, Technologies and Prospects // arXiv:2401.17812. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2401.17812
10. Lei B., Zhao Q., Mei J. Computing Power Network: An Interworking Architecture of Computing and Network Based on IP Extension // Proceedings of the 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR, Paris, France, 07–10 June 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/HPSR52026.2021.9481792
11. Li S., Li T., Zhou X. Computing Power Network: A Network-Centric Supply Paradigm for Integrated Resources // ZTE Technology Journal. 2021. Vol. 27. Iss. 3. PP. 29–34. DOI:10.12142/ZTETJ.202103007
12. Tang X., Cao C., Wang Y., Zhang S., Liu Y., Li M., et al. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement // China Communications. 2021. Vol. 18. Iss. 2. PP. 175–185. DOI:10.23919/JCC.2021.02.011. EDN:FDUIVB
13. Cao C., Zhang S., Liu Y., Tang X. Convergence of telco cloud and bearer network based computing power network orchestration // Telecommunications Science. 2020. Vol. 36. Iss. 07. PP. 55–62.
14. Lei B., Wang J., Zhao Q., Yu Y., Yang M. Novel network virtualization architecture based on the convergence of computing, storage and transport resources // Telecommunications Science. 2020. Vol. 36. Iss. 7. PP. 42–54.
15. Liu J., Sun Y., Su J., Li Z., Zhang X., Lei B., et al. Computing Power Network: A Testbed and Applications with Edge Intelligence // Proceedings of the Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS, New York, USA, 02–05 May 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798112.
16. Smeliansky R. Network Powered by computing: Next generation of computational infrastructure // Edge Computing – Technology, Management and Integration. Iss. IntechOpen. 2023. PP. 47–70. DOI:10.5772/intechopen.110178
17. Smeliansky R. Network Powered by Computing // Proceedings of the International Conference on Modern Network Technologies (MoNeTec, Moscow, Russian Federation, 27–29 October 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/MoNeTec55448.2022.9960771
18. Глушак Е.В. Облачные и туманные вычисления: архитектура, моделирование, применение. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 180 с. EDN:BUZGWB
19. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю., Самсонов М.Ю. Интернет вещей. Самара: ПУТИ, 2014. 342 с.
20. Росляков А.В., Герасимов В.В. Детерминированные сети связи и их стандартизация // Стандарты и качество. 2024. № 7. С. 42–47. DOI:10.35400/0038-9692-2024-7-70-24. EDN: UTBDXB
21. Ефименко А.А., Федосеев С.В. Организация инфраструктуры облачных вычислений на основе SDN сети // Экономика, статистика и экономика. Вестник УМО. 2013. № 5. С. 185–187. EDN:RPFQDD
22. Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 48–53. DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53. EDN:UYWULY
23. Rec. ITU-T Q.4140. Protocols and signalling for computing power networks. Signalling requirements for service deployment in computing power networks. 2023.
24. Rec. ITU-T Q.4141. Protocols and signalling for computing power networks. Requirements and signalling of intelligence control for the border network gateway in computing power networks. 2023.

References

1. Rec. ITU-T Y.2501. *Computing Power Network – framework and architecture*. 2021.
2. Smelyansky R.L. Evolution of the computing infrastructure. *Bulletin of Moscow University. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics*. 2024;4:190–233. (in Russ.) DOI:10.55959/MSU/01370782152024474190234. EDN:OZHXTV
3. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degrees Compared. *Proceedings of the Grid Computing Environment Workshop, 12–16 November 2008, Austin, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/GCE.2008.4738445
4. Duan Q. Service-Oriented Network Virtualization for Composition of Cloud Computing and Networking. *International Journal of Next-Generation Computing*. 2011;2(2):123–138.
5. Huawei Technology Report. *Computing 2030*. 2023. https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/giv/intelligent_world_2030_en.pdf
6. Lei B., Liu Z., Wang X., Yang M., Chen Y. Computing network: A new multiaccess edge computing. *Telecommunications Science*. 2019;35(9):44–51.
7. Yukun S., Bo L., Junlin L., Haonan H., Xing Z., Jing P. Computing power network: A survey. *China Communications*. 2024; 21(9):109–145. DOI:10.23919/JCC.ja.2021-0776
8. Zhao Q., Lei B., Wei M. Survey of computing power network. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*. 2022;3(3): 632–644. DOI:10.52953/BXBj6384. EDN:WJMMIH
9. Jia Q., Hu Y., Zhou X., Ma Q., Guo K., Zhang H., Xie R., Huang T., Liu Y. Deterministic Computing Power Networking: Architecture, Technologies and Prospects. *arXiv:2401.17812*. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2401.17812
10. Lei B., Zhao Q., Mei J. Computing Power Network: An Interworking Architecture of Computing and Network Based on IP Extension. *Proceedings of the 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing, HPSR, 07–10 June 2021, Paris, France*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/HPSR52026.2021.9481792
11. Li S., Li T., Zhou X. Computing Power Network: A Network-Centric Supply Paradigm for Integrated Resources. *ZTE Technology Journal*. 2021;27(3):29–34. DOI:10.12142/ZTETJ.202103007
12. Tang X., Cao C., Wang Y., Zhang S., Liu Y., Li M., et al. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement. *China Communications*. 2021;18(2):175–185. DOI:10.23919/JCC.2021.02.01.1. EDN:FDUIVB
13. Cao C., Zhang S., Liu Y., Tang X. Convergence of telco cloud and bearer network based computing power network orchestration. *Telecommunications Science*. 2020;36(7):55–62.

14. Lei B., Wang J., Zhao Q., Yu Y., Yang M. Novel network virtualization architecture based on the convergence of computing, storage and transport resources. *Telecommunications Science*. 2020;36(7):42–54.
15. Liu J., Sun Y., Su J., Li Z., Zhang X., Lei B., et al. Computing Power Network: A Testbed and Applications with Edge Intelligence. *Proceedings of the Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPS, 02–05 May 2022, New York, USA*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798112
16. Smeliansky R. Network powered by computing: Next generation of computational infrastructure. *Edge Computing – Technology, Management and Integration. IntechOpen*. 2023. p.47–70. DOI:10.5772/intechopen.110178
17. Smeliansky R. Network Powered by Computing. *Proceedings of the International Conference on Modern Network Technologies, MoNeTec, 27–29 October 2022, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/MoNeTec55448.2022.9960771
18. Glushak E.V. *Cloud and fog computing: architecture, modeling, application*. Moscow, Vologda: Infra-Engineering Publ.; 2025. 180 p. (in Rus.) EDN:BUZGWB
19. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu., Samsonov M.Yu. *Internet of Things*. Samara: PSUTI Publ.; 2014. 342 p. (in Rus.)
20. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Deterministic networks and their standardization. *Standards and Quality*. 2024;7:42–47. (in Rus.) DOI:10.35400/0038-9692-2024-7-70-24. EDN:UTBDXB
21. Efimenko A.A., Fedoseev S.V. Organization of cloud computing infrastructure based on SDN network. *Statistics and Economics*. 2013;5:185–187. (in Rus.) EDN:RPFQDD
22. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Mamoshina Yu.S., Sudareva M.E. Standardization of time-synchronized TSN networks. *Standards and Quality*. 2021;4:48–53. (in Rus.) DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53
23. Rec. ITU-T Q.4140. *Protocols and signalling for computing power networks. Signalling requirements for service deployment in computing power networks*. 2023.
24. Rec. ITU-T Q.4141. *Protocols and signalling for computing power networks. Requirements and signalling of intelligence control for the border network gateway in computing power networks*. 2023.


Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 09.10.2025.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 09.10.2025.

Информация об авторах:


РОСЛЯКОВ
Александр Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0000-0003-3130-8262>


АЛЕКСАХИН
Павел Алексеевич

аспирант кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0005-1979-4992>

МИХАЙЛОВ
Валерий Андреевич

инженер кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0002-0028-3402>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.