

Интеграция облачных, туманных и граничных вычислений: перспективы и вызовы цифровой трансформации

В.А. Черепенин, И.Е. Глазырин, Д. А. Лесников, С.П. Воробьев

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени
М.И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: В статье рассматриваются перспективы и вызовы интеграции облачных, туманных и граничных вычислений в условиях цифровой трансформации. Проведённый анализ показывает, что сочетание этих технологий позволяет оптимизировать обработку больших объёмов данных, повысить адаптивность систем и обеспечить информационную безопасность. Особое внимание уделено гибридным архитектурам, объединяющим преимущества централизованных и децентрализованных подходов. Рассматриваются практические аспекты, такие как использование симулятора «Энигма» для моделирования масштабируемых инфраструктур и архитектуры вычислений на основе облака, периферии и клиента (Edge Cloud-Client Computing - EC-CC) для интеллектуальных энергосетей и Интернета вещей (Internet of Things - IoT). Отдельно подчёркивается роль специализированных фреймворков в оптимизации маршрутизации и повышении надёжности инфраструктуры. Интеграция технологий способствует развитию ключевых отраслей, включая энергетику, медицину и IoT, несмотря на вызовы, связанные с обеспечением безопасности данных.

Ключевые слова: облачные вычисления, туманные вычисления, граничные вычисления, гибридные архитектуры, цифровая трансформация, большие данные, децентрализованные системы, интеграция вычислений, распределённые вычисления, безопасность данных, оптимизация ресурсов, скорость передачи данных, контейнеризация, масштабируемость.

Для успешной адаптации к динамичным изменениям рыночной среды и повышения производственной эффективности необходимо оперативно и точно осуществлять сбор, обработку и анализ значительных объёмов данных [1]. Х.М. Елеев отмечает, что хотя традиционные облачные методы управления данными остаются важным инструментом управления данными, их эффективность снижается из-за чрезмерных затрат на передачу информации и хранения огромных массивов данных, поступающих от миллионов, а то и миллиардов устройств. Интегрированная архитектура представляет собой сочетание централизованных и децентрализованных подходов, что позволяет объединить их преимущества, такие как масштабируемость, устойчивость к сбоям и гибкость системы. В то время как централизованные технологии строятся на клиент-серверной модели,

децентрализованные опираются на архитектуру распределенных реестров. Промежуточные решения, или гибридные технологии, базируются на одном из этих подходов, дополняя его элементами другого, что обеспечивает их универсальность [2]. Современные информационные технологии, используемые для управления высокотехнологичными процессами, требуют внедрения инновационных подходов, включая гибридные архитектуры, которые обеспечивают безопасный обмен данными и их надежную верификацию. По мнению И.М. Акулина и соавторов гибридные сети становятся компромиссным решением между скоростью централизованных систем и устойчивостью децентрализованных решений, что делает их крайне перспективными [3]. А.А. Березкин, Р.М. Вивчарь и Р.В. Киричек обращают внимание, что увеличение требований пользователей к объемам и качеству передачи данных, а также активное внедрение телекоммуникационных сетей на критически важных объектах инфраструктуры подчеркивают необходимость применения инновационных архитектурных моделей для обеспечения надежности и эффективности связи [4].

В современных условиях цифровой трансформации бизнес-процессов облачные вычисления являются одной из наиболее востребованных и значимых технологий. Этот подход к обработке данных основан на распределенной модели, при которой вычислительные мощности и ресурсы предоставляются пользователям через интернет в виде онлайн-сервисов [5]. Такой метод обеспечивает доступ к практически неограниченным мощностям по требованию, снижая финансовые вложения и предоставляя возможность работать с данными из любой точки мира при наличии интернет-соединения или доступа к локальной сети посредством веб-интерфейса [6]. Эффективность использования оборудования значительно возрастает, что приводит к увеличению производительности и масштабируемости систем. Главные преимущества данной технологии

включают доступность, гибкость и экономичность. На основе анализа научных исследований А.В. Бойковой [7], М.В. Шатурного [8], П.Е. Голосова и И.М. Гостева [9], А.Т. Гординой и А.В. Забродина [10], В.И. Мейкшана и Н.Б. Тесля [11] выделены следующие модели облачных вычислений, подразделяемые на категории, которые представлены на рисунке 1.

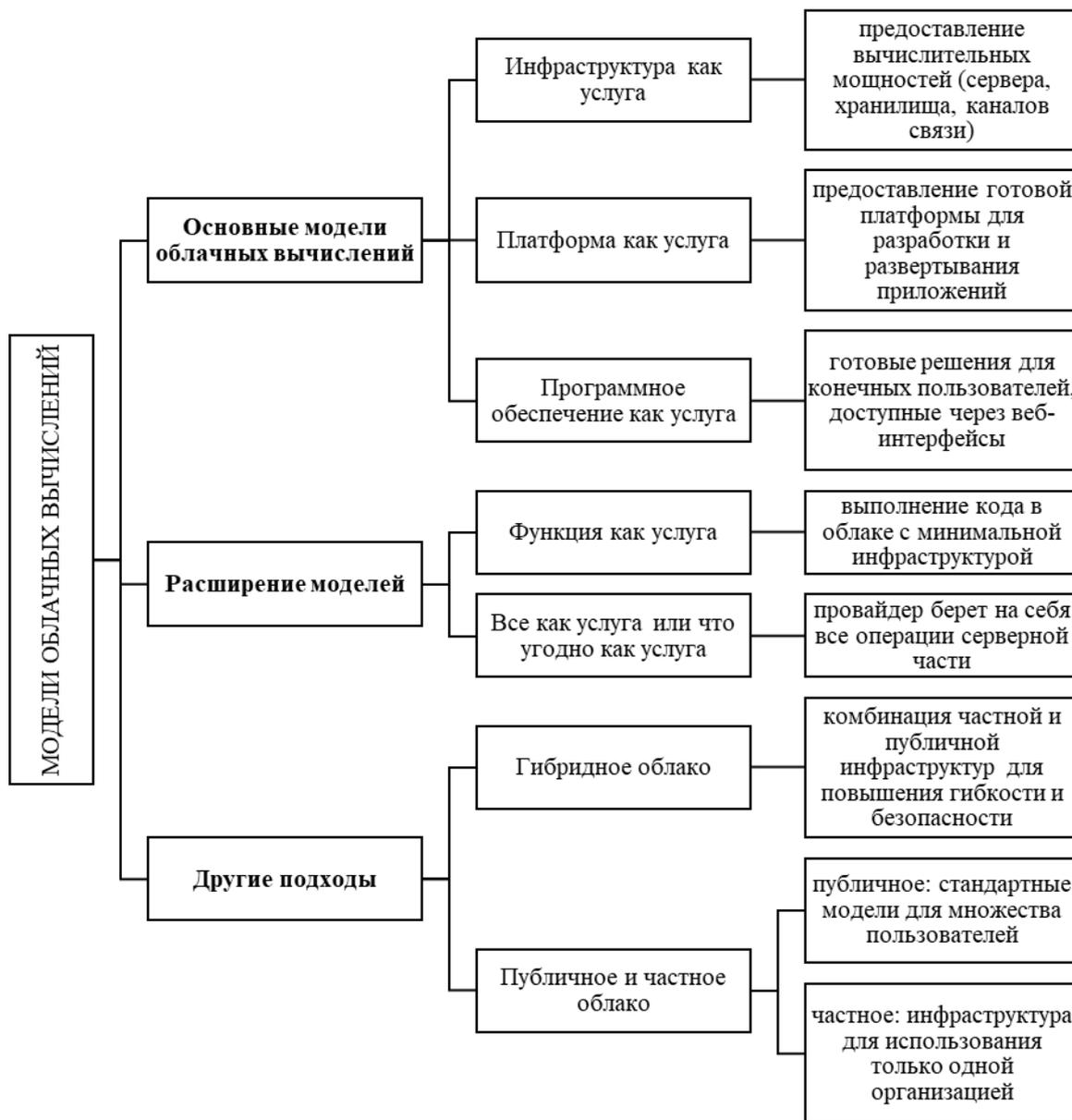


Рис. 1. – Категории моделей облачных вычислений

Большинство современных платформ строится на основе облачных вычислений, предоставляющих такие услуги, как хранение информации, сетевые решения и вычислительные ресурсы. Облачные технологии

оказываются особенно полезными для провайдеров услуг, так как позволяют сократить расходы на создание и обслуживание физической инфраструктуры [12]. Технология поддерживает различные устройства и платформы, такие как мобильные телефоны, планшеты и стационарные рабочие станции, что делает её универсальной и удобной для широкого круга пользователей.

Туманные вычисления представляют собой следующий шаг в развитии многоуровневых облачных архитектур и призваны значительно трансформировать методы и модели распределения вычислительных задач, оказывая влияние на взаимодействие между пользователями и операторами. Основой новой парадигмы является использование сетевых устройств последней мили и конечных пользовательских устройств в роли вычислительных узлов, что привело к появлению распределенных вычислений нового поколения — туманных вычислений. Одним из главных преимуществ туманных вычислений является возможность локальной обработки данных на устройствах, расположенных ближе к источнику их генерации. Это существенно снижает задержки передачи информации, уменьшает нагрузку на центральные узлы и оптимизирует использование сетевых ресурсов [13]. Благодаря этому обеспечивается эффективное использование ресурсов и гибкость системы.

Концептуально туманные вычисления расширяют облачные технологии, добавляя возможности обработки данных на промежуточных узлах, что минимизирует сетевые задержки и увеличивает производительность приложений. Таким образом, туманные вычисления соединяют функциональность облачных систем и конечных устройств, обеспечивая хранение, обработку и управление данными как в облаке, так и на периферии сети. Ключевые черты туманных вычислений включают географическую распределенность, низкую задержку, поддержку разнородных данных и способность к динамической адаптации [14].

«Туманная среда» представляет собой логическое расширение традиционных облачных решений до периферии сети. Это расширение дополняет централизованную модель обработки данных, передавая часть функций хранения и анализа информации на граничные узлы. Такой подход позволяет успешно справляться с задачами, возникающими в условиях быстрого роста числа подключенных устройств и объема обрабатываемых данных. Главной особенностью туманных вычислений является распределение вычислительной нагрузки. В туманных системах выполнение задач обработки данных предполагает оптимизацию с учетом конкретных критериев и ограничений, определяемых требованиями системы [15]. Это помогает снизить нагрузку на сеть передачи данных и оптимизировать работу вычислительных узлов. Локализация обработки данных на уровне граничных узлов позволяет значительно уменьшить задержки и повысить производительность приложений [16]. Такая организация особенно актуальна для сенсорных сетей и систем Интернета вещей (Internet of Things - IoT), где важна скорость обработки информации.

В отличие от облачных вычислений, которые часто сталкиваются с высокими задержками из-за удаленности центральных серверов, туманные вычисления обеспечивают более быструю обработку данных, расположив узлы ближе к источнику их генерации. Это сокращает время отклика системы и увеличивает ее эффективность [17]. Кроме того, использование периферийных вычислений позволяет обрабатывать информацию локально на устройствах, что снижает объем передаваемых данных и нагрузку на центральные системы. Специализированные узлы IoT могут выполнять предварительную обработку, фильтрацию и обобщение данных перед их отправкой на облачные серверы, что значительно уменьшает требования к пропускной способности сети [18]. Это делает туманные вычисления

оптимальным решением для систем реального времени, промышленного мониторинга и инфраструктур с высокой плотностью устройств.

Граничные вычисления представляют собой инновационную архитектуру, которая значительно расширяет функциональные возможности облачных технологий, размещая вычислительные ресурсы в непосредственной близости от источников данных [19]. Эта технология является важнейшим этапом эволюции информационных систем, позволяя перенести обработку данных с централизованных серверов на клиентские узлы или устройства, расположенные на периферии сети. Такой подход позволяет решать задачи локально, сокращая задержки и снижая нагрузку на центральные вычислительные мощности [20]. Это кардинально изменяет подход к минимизации времени отклика и оптимизации обработки информации [21]. Ключевая особенность этой технологии заключается в децентрализации процессов обработки, что не только снижает сетевые задержки, но и увеличивает общую производительность системы.

Одним из главных преимуществ граничных вычислений является способность эффективно управлять маршрутизацией данных и распределять сетевые ресурсы [22]. Это особенно важно для систем и приложений, предъявляющих высокие требования к пропускной способности и скорости отклика [21]. Размещение серверов на границах сети позволяет минимизировать временные задержки, что делает граничные вычисления незаменимыми для задач, требующих высокой оперативности, таких как системы реального времени или критически важные информационные платформы. Мобильные граничные вычисления представляют собой важное направление данной технологии. Они позволяют перераспределять задачи вычислений с мобильных устройств на граничные серверы, расположенные вблизи источников данных. Ключевым аспектом эффективного использования граничных вычислений является рациональное распределение

ресурсов. Это позволяет минимизировать время задержки передачи данных и оптимизировать производительность телекоммуникационных систем, особенно в средах с высокой нагрузкой и требованиями к быстрдействию [23]. Однако децентрализованный характер граничных вычислений порождает дополнительные вызовы, касающиеся обеспечения безопасности и конфиденциальности данных, которые хранятся и обрабатываются на промежуточных узлах [20]. Локализация обработки информации требует разработки надежных механизмов защиты, чтобы предотвратить несанкционированный доступ и утечку данных в распределенных средах. На основе проведенного исследования предложена краткая схема, представленная на рисунке 2, которая отражает сравнение ключевых характеристик моделей интеграции.

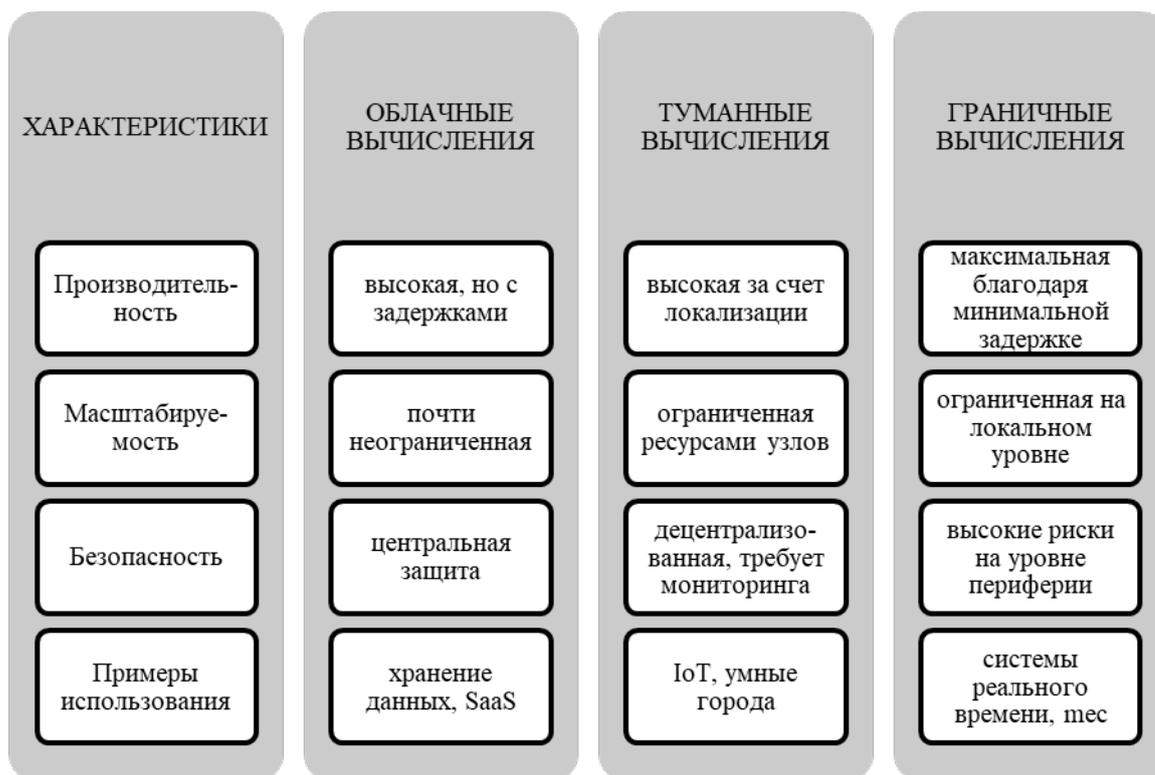


Рис. 2. – Сравнение моделей интеграции

К недостаткам облачных вычислений относятся задержки при передаче данных, вызванные значительной удалённостью центральных серверов, а также зависимость от стабильного доступа к сети Интернет. В случае

поступления большого количества запросов на сервер могут наблюдаться задержки в обработке информации, что затрудняет использование таких технологий в режиме реального времени. Для туманных вычислений предъявляются высокие требования к информационной инфраструктуре, от надёжности которой зависит качество передачи данных. При обработке больших объёмов информации могут возникать задержки из-за ограниченной пропускной способности периферийных узлов. Туманные вычисления работают в сочетании с облачными технологиями, что может создавать трудности при их интеграции. Децентрализованный характер граничных вычислений требует тщательного подхода к обеспечению безопасности, что связано с высокими затратами на создание распределённой структуры и поддержание безопасного соединения. Кроме того, в условиях высокой нагрузки граничные вычисления могут не справляться с управлением ресурсами.

Интеграция облачных, туманных и граничных вычислений позволяет создавать системы благодаря, которым становится возможным управление большими данными, повышение скорости передачи данных, а также безопасная реализация технологии IoT. В исследовании Э. Дель-Посо-Пуныаль, Ф. Гарсия-Карбальейра и Диего Камармас-Алонсо рассматривается и детально описывается симулятор «Энигма», представляющий собой инструмент для моделирования масштабируемых вычислительных инфраструктур, охватывающий облачные, туманные и периферийные вычисления. Этот симулятор обеспечивает высокую эффективность при симуляции значительного количества устройств и компонентов, а также предоставляет возможности для анализа различных параметров, таких как загрузка процессора, энергопотребление, пропускная способность сети и длительность выполнения приложений. Основной задачей «Энигма» является исследование новых типов вычислительных инфраструктур и алгоритмов.

Проведенный анализ масштабируемости выявил важность разработки симуляторов, способных моделировать крупные инфраструктуры, содержащие сотни и даже тысячи сенсоров и устройств, что и реализовано в «Энигма». Данный инструмент позволяет пользователям создавать индивидуальные среды или платформы, задавая параметры через файлы табличного текстового формата с разделителями или «Эксель». Среди ключевых преимуществ «Энигма» выделяется возможность значительного увеличения числа моделируемых элементов в системе. По этим характеристикам «Энигма» превосходит многие существующие на сегодняшний день симуляторы, применяемые для аналогичных целей [24].

Детальное исследование вычислений на основе облака, периферии и клиента (Edge Cloud-Client Computing - EC-CC) и их возможностей в рамках интеллектуальных энергосетей, предназначенных для интеграции значительного числа распределенных устройств, было проведено Ц. Ли, Ч. Гу, Ю. Сян и Ф. Ли. Особое внимание в архитектуре вычислений на основе облака в интеллектуальных энергосетях уделено вопросам безопасности оборудования и повышению качества пользовательского опыта. Аппаратные и программные компоненты активно используются для обеспечения этих целей. Архитектура системы EC-CC структурирована в виде четырех слоев: восприятия, сети, вычислений на границе и приложений. Это обеспечивает выполнение базовых функций, необходимых для работы вычислительных систем. Среди основных вызовов, с которыми сталкивается система EC-CC, выделяются проблемы интеграции данных, обеспечение безопасности и виртуализации контейнеров. Система EC-CC демонстрирует высокую эффективность при обработке большого объема разнородных данных, поступающих от различных терминалов в рамках интеллектуальных энергосетей. Учитывая сценарии, приведённые в исследовании, EC-CC рассматривается как перспективная вычислительная методология для

интеллектуальных энергосетей, построенных на базе IoT, с широким спектром возможных приложений. По мере развития системы ЕС-СС становится возможной полная интеграция интеллектуальных терминалов с новыми технологиями, что играет ключевую роль в снижении углеродного следа и создании устойчивой энергосистемы будущего [25].

В научной работе Л. Мас, Ж. Вилаплана, Ж. Матео и Ф. Сольсона предложен фреймворк для моделирования туманных вычислений, основанный на принципах теории массового обслуживания. Разработанный инструмент использовался для проведения симуляции в рамках заданного сценария, позволяя гибко настраивать параметры системы в соответствии с пользовательскими требованиями. Итоги исследования демонстрируют, что предложенная модель является эффективным инструментом для создания оптимальных архитектур туманных вычислений с учетом требований к качеству обслуживания. После завершения симуляции предоставляются ключевые метрики, связанные с качеством обслуживания: пропускная способность, время отклика и уровень использования узлов системы. Результаты анализа показывают, что с помощью предложенного подхода можно получить значимые метрики производительности, которые позволяют понять, как эффективно распределять ресурсы перед этапами проектирования и внедрения системы, соблюдая заданные ограничения качества обслуживания или соглашение об уровне обслуживания [26].

Основной целью научной работы А. Миускович, А. Кьюменто, Р. Бемтуис, А. Алдеа и П. Хавинга являлось создание структуры, предназначенной для оценки и классификации различных подходов к управлению ресурсами, которые могут быть применены в контексте облачных, туманных и периферийных вычислений. В рамках исследования сначала рассматриваются актуальные проблемы в области облачных, туманных и периферийных вычислений, с акцентом на аспекты, связанные с

эффективным управлением ресурсами. Затем проводится анализ существующих решений, представленных в научной литературе, направленных на решение этих задач. В процессе исследования было выделено и детально изучено 16 различных подходов к управлению ресурсами. На основе проведенного анализа разработана таксономия, которая позволяет эффективно оценивать эти подходы. Одним из значительных достижений исследования является разработка структуры, объединяющей классификацию и оценку методов управления ресурсами [27].

Исследование, посвященное разработке арифметического фреймворка, предназначенного для проектирования проводных систем вычислений на границе было проведено Р.П. Хуан, А. Сальвадор, Г. Катя, Б. Кристина, Ж. Карлос. Основная цель этого подхода - оптимизация процесса пересылки пакетов с использованием методов целочисленного деления и модульной арифметики. Разработанный фреймворк был формализован с помощью двух различных методов формального описания: «Спин» / «Промела» и алгебры коммуницирующих процессов. При этом «Спин» / «Промела» рассматривается как метод, учитывающий временные характеристики, в то время как алгебра коммуницирующих процессов относится к подходам, не зависящим от времени. Базовая модель, реализованная с использованием языка «Промела», предполагает многократное тестирование через симулятор «Спин». При этом варьируются значения параметра k , что позволяет исследовать влияние данного параметра на полученные результаты. Предложенная модель использует целочисленные деления по параметру k для определения положения элемента в заданной иерархии слоев, а также модульную арифметику для выполнения вычислений. Ключевым преимуществом первого подхода (целочисленного деления) является его простота, что обеспечивает более быстрое время отклика при определении корректного маршрута пересылки. Это особенно актуально в условиях, где

критично время обработки данных. Несмотря на это, второй метод, связанный с модульной арифметикой, сохраняет универсальность и может быть применен в различных условиях, вне зависимости от конфигурации системы [28].

Согласно анализу международного опыта научных исследований можно сделать вывод, что интеграция облачных, туманных и граничных вычислений помогает улучшить показатели скорости обработки данных, адаптивности и поддержания информационной безопасности. Так, использование симулятора «Энигма» позволяет достичь быстрой обработки больших данных в режиме реального времени, применение архитектуры ЕС-СС помогает улучшить обмен данными между различными устройствами, а также визуализировать процессы передачи данных. Разработка специализированных фреймворков способствует оптимизации маршрутизации и повышению надежности инфраструктуры в условиях возрастающей нагрузки. Необходимо отметить, что развитие вычислительных моделей напрямую связано с повышением производительности в таких сферах, как энергетика, медицина, IoT и других. Также важно подчеркнуть, что, несмотря на наличие рисков, связанных с информационной безопасностью, их полезное действие остается преобладающим.

Под облачными технологиями понимается подход, при котором пользователям предоставляются виртуальные ресурсы, включая аппаратное и программное обеспечение. Это позволяет избежать необходимости приобретения или разработки собственных ресурсов, предоставляя возможность аренды нужных компонентов. Облачные технологии нашли широкое применение в бизнес-среде благодаря возможности предоставления доступа через интернет или доступа к локальной сети независимо от географического положения пользователя, неограниченности ресурсов,

доступной ценовой политике, за счёт оптимизации информационной инфраструктуры, что обеспечивает гибкость. Туманные вычисления основываются на применении сетевых устройств, расположенных на уровне последней мили, а также конечных пользовательских устройств в качестве вычислительных узлов, что позволяет обрабатывать данные вблизи источников генерации, за счёт чего происходит оптимизация процесса передачи данных. Туманные вычисления могут быть рассмотрены как самостоятельное решение, а также как расширение облачных технологий. Граничные вычисления позволяют осуществлять обработку данных на периферийных устройствах, их также можно рассматривать совместно с облачными вычислениями, и они, как туманные вычисления, позволяют оптимизировать обработку данных, повышая производительность. Главной проблемой облачных вычислений является увеличение времени отклика в случае большого числа запросов, для туманных вычислений – повышенные требования к работоспособности инфраструктуры, а для граничных вычислений – высокие требования к безопасности. Интеграция этих трёх моделей поможет создать высокоэффективную архитектуру. Анализ практических исследований международного опыта интеграции облачных, туманных и граничных вычислений показал, что на сегодняшний день применяемые инструменты и методологии находятся на высоком уровне развития. Применение симулятора «Энигма» и фреймворков на основе теории массового обслуживания позволяет создавать высокотехнологичные инфраструктуры с высокой производительностью, архитектуры ЕС-СС помогают обрабатывать неструктурированные массивы данных, в то же время остаются актуальными вопросы обеспечения безопасности данных и гармоничной интеграции различных технологических решений.

Литература

1. Красов А.В., Тасюк А.А. Проектирование системы обнаружения вторжений для информационной сети с использованием больших данных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. №1. С. 70–76.
 2. Елеев Х.М. Федеративное обучение для IoT и AIoT: применения, проблемы и перспективы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. №2. С. 26–33.
 3. Акулин И.М., Чеснокова Е.А., Свиркин М.В., Балыкина Ю.Е., Пресняков Р.А., Васин А.Г., Гурьянова Н.Е. Применение технологии распределенного реестра и смарт-контрактов в медицине // Менеджер здравоохранения. 2020. №1. С. 47–55.
 4. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. №1. С. 18–25.
 5. Виноградова А.Р., Черепанов С.П. Облачные вычисления и особенности их использования в банковской сфере // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2020. Т. 11. №51. С. 183–186.
 6. Холодная Е.В. О некоторых юридически значимых особенностях технологий облачных вычислений // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). 2023. Т. 2. №102. С. 153–161.
 7. Бойкова А. В. Подход к технико-экономическому обоснованию выбора модели облачных технологий для вооруженных сил РФ // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. №8 (102). С. 22-24.
 8. Шатурный М. В. Особенности обеспечения безопасности облачных систем // Инженерный вестник Дона. 2024. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9390
-



9. Голосов П. Е., Гостев И. М. Имитационная модель облачных вычислений со спорадическим механизмом управления параллельным решением задач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. №2. С. 269-278.

10. Гордина А. Т., Забродин А. В. Особенности технологий бессерверных вычислений // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. №1 (29). С. 16-23.

11. Мейкшан В. И., Тесля Н. Б. Выбор оптимального размещения данных при использовании облачной инфраструктуры // Доклады АН ВШ РФ. 2021. №2 (51). С. 34-42.

12. Лю Н. Направления развития цифровых платформ в государственном секторе экономики Китая // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2021. Т. 4. №130. С. 168–172.

13. Волков А.Н. Задача маршрутизации в сети динамических туманных вычислений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. №4. С. 27–37.

14. Кирсанова А.А., Радченко Г.И., Черных А.Н. Обзор технологий организации туманных вычислений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9. №3. С. 35–63.

15. Курейчик В.М., Сафроненкова И.Б. Онтологический подход к реализации технологий распределенных вычислений в сети Интернет // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. Т. 4. №214. С. 71–82.

16. Хомоненко А.Д., Кириенко А.Б., Пугачев С.В. Оценивание оперативности туманных вычислений в геоинформационных системах // Инженерный вестник Дона. 2024. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9315

17. Черепенин В.А., Воробьев С.П. Интеграция и оптимизация систем облачных, туманных и граничных вычислений: моделирование, задержки и алгоритмы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2024. Т. 3. №223. С. 19–25.

18. Шахов В.В., Юргенсон А.Н. К вопросу о повышении эффективности беспроводных систем мониторинга промышленных объектов // Труды Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем». 2021. Т. 1. С. 40–47.

19. Довгаль В.А. Анализ реализации федеративного обучения в граничных вычислениях с помощью FL-протокола // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2022. Т. 4. №311. С. 60–65.

20. Гасанова З.А., Мунистер В.Д., Мусалов М.А. Правовые проблемы обеспечения процесса осуществления информационных услуг в распределенных вычислительных системах // Право и государство: теория и практика. 2022. Т. 1. №205. С. 212–215.

21. Шагов Н.С., Мамедова Н.А., Уринцов А.И. Особенности разработки распределенного аппаратно-программного комплекса для контроля исполнения решений в области транспортной телематики // Инновации и инвестиции. 2023. Т. 7. С. 182–188.

22. Грызунов В.В., Гришечко А.А., Сипович Д.Е. Выбор наиболее опасных уязвимостей для перспективных информационных систем критического применения // Вопросы кибербезопасности. 2022. Т. 1. №47. С. 66–75.

23. Чипсанова Е.В., Елагин В.С. Методы распределения ресурсов концепции мобильных граничных вычислений // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. №1. С. 4–13.

24. Del-Pozo-Puñal E., García-Carballeira F., Camarmas-Alonso D. A scalable simulator for cloud, fog and edge computing platforms with mobility support // *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 144. pp. 117–130.

25. Li J., Gu C., Xiang Y., Li F. Edge-cloud computing systems for smart grid: state-of-the-art, architecture, and applications // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2022. Vol. 10. №4. pp. 805–817.

26. Mas L., Vilaplana J., Mateo J., Solsona F. A queuing theory model for fog computing // *The Journal of Supercomputing*. 2022. Vol. 78. pp. 11138–11155.

27. Mijuskovic A., Chiumento A., Bemthuis R., Aldea A., Havinga P. Resource management techniques for cloud/fog and edge computing: an evaluation framework and classification // *Sensors*. 2021. Vol. 21. №5. URL: doi.org/10.3390/s21051832

28. Roig P.J., Alcaraz S., Gilly K., Bernad C., Juiz C. Modeling an edge computing arithmetic framework for IoT environments // *Sensors*. 2022. Vol. 22. №3. URL: doi.org/10.3390/s22031084

References

1. Krasov A.V., Tasjuk A.A. Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli. 2020. Vol. 12. №1. pp. 70–76.

2. Eleev H.M. Izvestija Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN. 2024. Vol. 26. №2. pp. 26–33.

3. Akulin I.M., Chesnokova E.A., Svirkin M.V., Balykina Ju.E., Presnjakov R.A., Vasin A.G., Gur'janova N.E. Menedzher zdavoohranenija. 2020. №1. PP. 47–55.

4. Berezkin A.A., Vivchar' R.M., Kirichek R.V. Trudy uchebnyh zavedenij svjazi. 2024. Vol. 10. №1. pp. 18–25.

5. Vinogradova A.R., Cherepanov PP.P. Voprosy studencheskoj nauki. 2020. Vol. 11. №51. pp. 183–186.



6. Holodnaja E.V. Vestnik Universiteta imeni O.E. Kutafina (MGJuA). 2023. Vol. 2. №102. pp. 153–161.
 7. Bojkova A. V. Jekonomika i biznes: teorija i praktika. 2023. №8 (102). pp. 22-24.
 8. Shaturnyj M. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9390
 9. Golosov P. E., Gostev I. M. Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2022. №2. pp. 269-278.
 10. Gordina A. T., Zabrodin A. V. Intellektual'nye tehnologii na transporte. 2022. №1 (29). pp. 16-23.
 11. Mejkshan V. I., Teslja N. B. Doklady AN VSh RF. 2021. №2 (51). pp. 34-42.
 12. Lju N. Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo jekonomicheskogo universiteta. 2021. T. 4. №130. pp. 168–172.
 13. Volkov A.N. Trudy uchebnyh zavedenij svjazi. 2024. Vol. 10. №4. pp. 27–37.
 14. Kirsanova A.A., Radchenko G.I., Chernyh A.N. Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Vychislitel'naja matematika i informatika. 2020. Vol. 9. №3. pp. 35–63.
 15. Kurejchik V.M., Safronenkova I.B. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2020. Vol. 4. №214. pp. 71–82.
 16. Homonenko A.D., Kirienko A.B., Pugachev PP.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9315
 17. Cherepenin V.A., Vorob'ev PP.P. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 2024. Vol. 3. №223. pp. 19–25.
 18. Shahov V.V., Jurgenson A.N. Trudy Mezhdunarodnoj Aziatskoj shkoly-seminara «Problemy optimizacii slozhnyh sistem». 2021. Vol. 1. pp. 40–47.
-

19. Dovgal' V.A. Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvenno-matematicheskie i tehnicheckie nauki. 2022. Vol. 4. №311. pp. 60–65.
20. Gasanova Z.A., Munister V.D., Musalov M.A. Pravo i gosudarstvo: teorija i praktika. 2022. Vol. 1. №205. pp. 212–215.
21. Shagov N. S., Mamedova N.A., Urincov A.I. Innovacii i investicii. 2023. Vol. 7. pp. 182–188.
22. Gryzunov V.V., Grischechko A.A., Sipovich D.E. Voprosy kiberbezopasnosti. 2022. Vol. 1. №47. pp. 66–75.
23. Chipsanova E.V., Elagin V.PP. Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli. 2024. Vol. 16. №1. pp. 4–13.
24. Del-Pozo-Puñal E., García-Carballeira F., Camarmas-Alonso D. Future Generation Computer Systems. 2023. Vol. 144. pp. 117–130.
25. Li J., Gu C., Xiang Y., Li F. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2022. Vol. 10. №4. pp. 805–817.
26. Mas L., Vilaplana J., Mateo J., Solsona F. The Journal of Supercomputing. 2022. Vol. 78. pp. 11138–11155.
27. Mijuskovic A., Chiumento A., Bemthuis R., Aldea A., Havinga P. Resource management techniques for cloud/fog and edge computing: an evaluation framework and classification. Sensors. 2021. Vol. 21. №5. URL: doi.org/10.3390/s21051832
28. Roig P.J., Alcaraz S., Gilly K., Bernad C., Juiz C. Modeling an edge computing arithmetic framework for IoT environments. Sensors. 2022. Vol. 22. №3. URL: doi.org/10.3390/s22031084.

Дата поступления: 7.12.2024

Дата публикации: 26.01.2025