

Анализ влияния Green IT на распределенные Туманные вычисления: возможности и вызовы

Ван Тханг Данг

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

thangdang.251196@gmail.com

Артем Н. Волков

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

artem.nv@sut.ru

Аннотация. В условиях стремительного развития технологий Туманные вычисления (с англ. Fog Computing) рассматривается как перспективное решение для обработки распределенных данных, особенно в сфере IoT и приложений Телеприсутствия. Однако высокий уровень потребления ресурсов в таких системах создает серьезные вызовы, связанные с их производительностью и воздействием на окружающую среду. Концепция Green IT выступает в качестве эффективного подхода, направленного на бережливое использование сетевых и вычислительных ресурсов, что позволит снизить или нивелировать энергопотребление и уменьшение выбросов CO₂. В данной статье анализируются проблемы, с которыми сталкиваются Fog Computing, а также оценивается соответствующее влияние Green IT. Исследование предоставляет объективный взгляд на возможности и вызовы, связанные с внедрением Green IT в Туманные вычисления.

Ключевые слова: fog computing, облачные вычисления, green IT, Internet of Things, энергопотребление

I. ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие информационных и коммуникационных технологий повысило потребность в эффективной обработке и хранении данных. В этом контексте Fog (туманные вычисления) стали эффективным решением, дополняющим Cloud Computing (облачные вычисления). Fog расширяет возможности вычислений и хранения данных за пределами традиционных центров обработки данных и облачных платформ, приближая их к источникам данных. Так, Fog открывает путь новым приложениям и улучшает производительность существующих систем, особенно в среде сверхплотных сетей Интернета вещей (IoT) и прочее.

Одним из ключевых преимуществ Fog является снижение задержек, ускорение отклика и повышение безопасности данных за счет обработки информации ближе к месту ее создания, а не передачи всего массива данных в облако. Однако одной из главных проблем Fog является высокий уровень энергопотребления конечными устройствами. Эксплуатация таких систем требует не только оптимизации ресурсов, но и оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Согласно отчету Программы ООН по окружающей среде (UNEP, 2020), сектор информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) вносит около 3 % от общего объема глобальных выбросов CO₂, и ожидается, что эта цифра утроится к 2030 году [1].

В этом контексте концепция Green IT (зеленые информационные технологии) становится важной тенденцией, направленной на минимизацию воздействия ИТ-систем на экологию. Применение Green IT включает в себя:

- разработку, производство и переработку электронного оборудования с акцентом на энергоэффективность и экологическую безопасность;
- использование новых технологий, таких как энергоэффективные чипы, многоядерные системы, оптимизированные для ИИ, а также распределенные архитектуры, повышающие производительность и снижающие энергопотребление;
- переход от традиционных центров обработки данных к облачным или гибридным центрам с использованием возобновляемых источников энергии и эффективных систем охлаждения.

Однако влияние Green IT на Туманные вычисления пока еще не изучено глубоко и всесторонне. Возникает вопрос: как можно интегрировать принципы Green IT в системы Fog Computing для повышения их эффективности и снижения энергопотребления?

Цель данной статьи – проанализировать и оценить влияние Green IT на Туманные вычисления путем обобщения теоретических данных и изучения существующих исследований в этой области. В статье будет рассмотрена взаимосвязь между Green IT и Fog, а также предложены возможные решения и направления будущих исследований, направленные на создание более эффективных и устойчивых систем Туманных вычислений.

II. ОБЗОР GREEN IT И ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

A. Green IT: концепция и основные принципы

Green IT (Green Information Technology) – это комплексный системный подход, направленный на оптимизацию работы информационных технологий (ИТ) с целью снижения энергопотребления и уменьшения выбросов CO₂. Green IT охватывает не только вопросы использования энергоэффективного оборудования, но и стратегии управления ресурсами, организацию инфраструктуры и оптимизацию рабочих процессов для обеспечения устойчивого развития.

В условиях распределенных систем, особенно в среде Edge Computing (с англ. Граничных вычислений) и Туманных вычислений, внедрение Green IT способствует

снижению затрат на электроэнергию, повышению производительности и защите окружающей среды. Ключевые принципы Green IT в распределенных системах включают.

Виртуализация: Виртуализация позволяет более эффективно использовать ресурсы за счет выполнения нескольких приложений на минимальном количестве физических серверов. Вместо работы множества отдельных серверов, системы могут консолидировать приложения на единой платформе, что снижает энергопотребление, уменьшает потребность в расширении физической инфраструктуры и оптимизирует использование ресурсов.

Динамическое управление энергопотреблением (Dynamic Power Management – DPM): Технология DPM позволяет системе адаптировать энергопотребление в зависимости от реальной нагрузки. Когда нагрузка низкая, ненужные компоненты могут переходить в энергосберегающий режим или полностью отключаться. Это помогает балансировать производительность и затраты на электроэнергию, что особенно важно для гибких архитектур Туманных вычислений.

«Зеленые» алгоритмы планирования (Green Scheduling Algorithms): Оптимизируют распределение ресурсов и последовательность выполнения задач, снижая энергопотребление без ущерба для производительности системы. К основным стратегиям относятся:

- приоритетная обработка ресурсоемких задач на энергоэффективных серверах;
- оптимальное распределение задач для предотвращения избыточной загрузки оборудования;
- гибкая настройка времени выполнения задач для максимального использования доступных ресурсов;
- эти принципы не только повышают эффективность ИТ-систем, но и сокращают их воздействие на окружающую среду, способствуя развитию «зеленых» технологий в сфере ИТ.

В. Энергетические вызовы в системах Fog

Туманные вычисления (Fog) – это модель распределенных вычислений, ориентированная на обработку данных на периферии сети, а также на пользовательских устройствах и устройствах IoT, ближе непосредственно к их источнику, вместо передачи всей информации в центр обработки данных или облако. Такой подход снижает задержку распространения, повышает безопасность и улучшает обработку данных в реальном времени, что особенно важно для IoT-приложений, таких как интеллектуальные системы мониторинга, автономные транспортные средства и другие решения, требующие мгновенного отклика, а также услуг Телеприсутствия.

Однако эффективное функционирование Fog требует не только высокопроизводительных вычислительных ресурсов, но и оптимизации энергопотребления, поскольку Fog-устройства работают непрерывно, обрабатывая большие объемы данных. Основные проблемы энергопотребления в Fog включают:

Локальная обработка данных: В отличие от облачных вычислений, где обработка централизована в

крупных центрах обработки данных с оптимизированной инфраструктурой, Fog-узлы выполняют вычисления на месте. Это увеличивает нагрузку на локальные процессоры (CPU/GPU), что ведет к повышенному энергопотреблению. Согласно исследованию Gupta и др. (2016), энергопотребление одного узла Fog может варьироваться от 100 Вт до 500 Вт в зависимости от типа оборудования и нагрузки [2].

Поддержание постоянного соединения: Fog-узлы должны поддерживать постоянное соединение с устройствами IoT и облачными серверами, что требует значительных затрат энергии для стабильной передачи данных. Исследование Alharbi & Aldossary (2021) показывает, что передача данных по беспроводным каналам связи, таким как Wi-Fi и мобильные сети (4G/5G), потребляет около 30 % общей энергии Fog-устройств [3].

Неэффективное управление ресурсами: Без эффективных механизмов координации ресурсы Fog-узлы могут использоваться неравномерно, что приводит к неэффективному энергопотреблению. Согласно исследованию Mahmud и др. (2018), применение стратегий динамического управления ресурсами может сократить энергопотребление на 20–30 % [4].

Несбалансированная нагрузка: В туманных вычислениях могут возникать перегрузки отдельных узлов, что приводит к чрезмерному энергопотреблению одних устройств, в то время как другие остаются недогруженными. Исследование Qureshi и др. (2020) показывает, что динамические алгоритмы планирования задач могут сократить энергопотребление на 15–25 % по сравнению с традиционными методами распределения нагрузки [5].

С. Экологическое влияние систем Fog

Высокое энергопотребление систем Fog не только увеличивает операционные затраты, но и оказывает негативное воздействие на окружающую среду. По данным Министерства энергетики США (DOE, 2022), система из 1 000 узлов Fog может потреблять до 1,5 МВт·ч в день, что эквивалентно 550 тоннам выбросов CO₂ в год при использовании электроэнергии от ископаемого топлива.

Данные исследования также прогнозируют, что без эффективных стратегий управления энергией глобальное энергопотребление Fog-систем может увеличиться в 5 раз к 2030 году, что станет серьезным вызовом для «зеленых» ИТ-инициатив.

Эти проблемы подчеркивают необходимость интеграции принципов Green IT в системы Туманных вычислений, чтобы повысить их эффективность, сократить потери энергии и минимизировать негативное влияние на окружающую среду.

III. ВЛИЯНИЕ GREEN IT НА ТУМАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

А. Снижение энергопотребления

Значимость концепции Green IT (Green Information Technology) в контексте Туманных вычислений обусловлена её способностью снижать общее энергопотребление за счёт эффективной оптимизации ресурсов и повышения производительности. Одним из наиболее действенных подходов считается виртуализация и консолидация вычислительных

ресурсов, благодаря которым несколько приложений и сервисов могут функционировать на меньшем количестве физических серверов, что непосредственно приводит к сокращению энергозатрат.

По данным Beloglazov и др. (2012), консолидация ресурсов способна уменьшить энергопотребление распределённых центров обработки данных на 25–50 % [6]. Более того, интеллектуальное управление энергопотреблением (Smart Power Management) является ключевым инструментом, позволяющим регулировать производительность Fog-узлов в зависимости от динамики нагрузки. При небольшом количестве обрабатываемых запросов система может снижать тактовую частоту процессоров или переводить оборудование в энергосберегающий режим без критического уменьшения производительности. Как отмечают Gai и др. (2019), подобные методы Green IT позволяют сократить энергопотребление в Fog-системах на 20–40 % благодаря рациональному распределению ресурсов [7].

В. Улучшение производительности и продление срока службы оборудования

Оптимизация энергопотребления оказывает комплексное влияние не только на экономию электроэнергии, но и на увеличение длительности эксплуатации аппаратных компонентов в системах Fog. Уменьшение энергозатрат ведёт к снижению тепловыделения, тем самым снижая вероятность перегрева – одного из основных факторов досрочного выхода из строя оборудования. Согласно исследованию Mukherjee и др. (2018), понижение рабочей температуры устройств на 10 % может продлить их жизненный цикл приблизительно на 20 % [8].

Дополнительно адаптивные алгоритмы планирования энергопотребления (Adaptive Energy Scheduling) корректируют степень задействования ресурсов, исходя из фактической нагрузки, тем самым поддерживая оптимальный баланс между производительностью и энергозатратами. Исследование Nameed и др. (2021) подтверждает, что эффективные механизмы управления энергией продлевают срок службы аппаратуры на 15–25 %, уменьшая количество циклов включения/выключения и избегая избыточных операций [9].

С. Влияние на задержку и производительность сети

Несмотря на то, что Green IT способствует общему снижению энергетических издержек, некоторые её методы, при неправильном применении, могут негативно отразиться на производительности системы. Например, сокращение тактовой частоты или перевод узлов в режим ожидания (с англ. sleep mode) может увеличить задержку при возникновении срочных вычислительных задач.

Для приложений реального времени – таких, как автономный транспорт или телемедицинские системы критически важно обеспечивать быструю реакцию (требования URLLC), поэтому необходимо находить разумный компромисс между энергоэффективностью и поддержанием высокого уровня сервиса. Современные интеллектуальные алгоритмы энергосберегающего планирования дают возможность поддерживать стабильное функционирование сети и оборудования,

сводя к минимуму рост задержек. Исследование Zhang и др. (2022) показывает, что адаптивные методы управления энергией позволяют снизить энергопотребление примерно на 30 %, одновременно увеличивая среднюю задержку обработки данных менее чем на 10 %, что обеспечивает сохранение требуемого качества обслуживания [10].

Д. Снижение выбросов CO₂ и влияние на окружающую среду

Крупномасштабные развёртывания систем Туманных вычислений влекут за собой значительные энергозатраты, что напрямую влияет на объёмы выбросов CO₂. Применение методов Green IT даёт возможность не только снизить операционные расходы, но и уменьшить негативное воздействие на экологию. Уменьшение потребления электроэнергии ведёт к сокращению «углеродного следа» центров обработки данных и Fog-устройств. Согласно Masanet и др. (2020), использование эффективных технологий Green IT может снизить выбросы CO₂ в ЦОДах на 15–20 % [11].

Важным направлением остаётся интеграция возобновляемых источников энергии (например, солнечной или ветряной генерации) в инфраструктуру и устройства Туманных вычислений, что даёт возможность уменьшить зависимость от ископаемого топлива и ещё больше сократить углеродные выбросы. По результатам исследования Bashroush и др. (2021), применение таких источников энергии в IT-системах способно снизить эмиссию CO₂ до 40 % по сравнению с традиционными решениями [12]. В докладе Greenpeace (2020) также указывается, что на IT-сектор приходится около 10 % общемирового энергопотребления, причём 30–40 % этого объёма возможно оптимизировать с помощью подходов Green IT – включая виртуализацию, интеллектуальное управление ресурсами, в том числе туманных вычислений, и использование возобновляемой энергетики [13].

IV. ВОЗМОЖНОСТИ И ВЫЗОВЫ

А. Возможности

Внедрение Green IT в системы Туманных вычислений приносит значительные преимущества, особенно в условиях стремления организаций к снижению эксплуатационных расходов и уменьшению воздействия на окружающую среду. Один из главных плюсов – повышение устойчивости систем Fog. Использование технологий виртуализации, динамического управления энергопотреблением, прогнозного и эффективного планирования вычислительных задач позволяет сократить энергопотребление без ущерба для производительности сервисов. Это, в свою очередь, снижает выбросы CO₂ и способствует устойчивому развитию, а также нивелирует рост потребляемой энергии центрами обработки данных. Дополнительно, оптимизация энергопотребления ведёт к снижению затрат на эксплуатацию. Когда Fog-устройства работают в более энергоэффективном режиме, затраты на электроэнергию и техническое обслуживание уменьшаются. Более того, Green IT способствует улучшению производительности приложения IoT и искусственного интеллекта. Энергоэффективные Fog-узлы могут обрабатывать больше задач без значительного увеличения энергопотребления. Это особенно важно для

высоконагруженных приложений реального времени, таких как медицинский мониторинг, интеллектуальные транспортные системы и «умные» города, а также метавселенные [14]. Оптимизация энергопотребления гарантирует, что такие системы могут стабильно работать в течение длительного времени, не перегружаясь и не прерывая работу сервисов.

В. Вызовы

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение Green IT в Туманные вычисления сопряжено с рядом серьезных вызовов. Одной из главных проблем является баланс между энергосбережением и сетевой производительностью. Некоторые методы экономии энергии, такие как снижение тактовой частоты процессоров или перевод узлов в спящий режим, могут привести к нежелательным задержкам.

Этот фактор особенно критичен для систем с низкими требованиями к задержке, таких как автономный транспорт, телемедицина или промышленная автоматизация. Поэтому необходимы интеллектуальные алгоритмы, которые позволят минимизировать энергопотребление без значительного снижения производительности.

Еще одним вызовом является высокая начальная стоимость внедрения технологий «Green IT». Обновление инфраструктуры для поддержки энергосберегающих технологий, таких как энергоэффективные алгоритмы, высокопроизводительные серверы, интеллектуальные системы охлаждения и возобновляемые источники энергии, требует значительных инвестиций. Однако в долгосрочной перспективе эти затраты окупаются за счет снижения эксплуатационных расходов и нивелирования роста спроса на энергоносители со стороны центров обработки данных.

Кроме того, для достижения максимальной эффективности Green IT требуются новые алгоритмы и архитектуры как систем вычисления, сетей, а также программного обеспечения (например, распространение бессерверной архитектуры для Туманных вычислений). Существующие методы управления энергопотреблением и планирования задач пока не полностью оптимизированы для среды Туманных вычислений, где рабочая нагрузка и условия сети постоянно меняются.

Будущие исследования могут быть сосредоточены на разработке более интеллектуальных алгоритмов энергосбережения, а также на поиске способов снижения затрат на внедрение Green IT, чтобы расширить его применение для туманных вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] UN Environment Programme. "Emissions Gap Report: Global progress report on climate action." 2020.
- [2] Gupta, H., Calheiros, R. N., Ghosh, S. K., & Buyya, R. (2016). *Fog computing: Principles, architectures, and applications*. Internet of Things, Elsevier.
- [3] Alharbi H.A., & Aldossary M. (2021). Energy-efficient edge-fog-cloud architecture for IoT-based smart agriculture environment. *IEEE Access*.
- [4] Mahmud R., Ramamohanarao K., & Buyya R. (2018). Latency-aware application module management for fog computing environments. *ACM Transactions on Internet Technology*.
- [5] Qureshi M.S., Qureshi M.B., Fayaz M., et al. (2020). A comparative analysis of resource allocation schemes for real-time services in high-performance computing systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [6] Beloglazov A., & Buyya R. (2012). "Energy efficient resource management in virtualized cloud data centers." *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2, 36–44.
- [7] Gai K., et al. (2019). "Green resource allocation for cloud-fog computing in IoT." *Future Generation Computer Systems*, 95, 298–306.
- [8] Mukherjee M., et al. (2018). "Impact of temperature on server reliability in data centers." *International Journal of Cloud Computing and Services Science*, 7(1), 77–86.
- [9] Hameed K., et al. (2021). "Adaptive energy scheduling for fog computing." *Journal of Systems Architecture*, 114, 101867.
- [10] Zhang C., He Q., Li F., Garg S. (2022). GAI-based resource and QoE aware service placement in next-generation multi-domain IoT networks. *IEEE Transactions on Computers*.
- [11] Masanet E., Shehabi A., Lei N., et al. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984-986. DOI: 10.1126/science.aba3758
- [12] Bashroush R., et al. (2021). "Renewable energy integration and cloud computing." *Energy Reports*, 7, 111–123.
- [13] Greenpeace. (2020). "Clicking Clean: Who is winning the race to build a green internet?" Gupta H., Calheiros R.N., Ghosh S.K., & Buyya R. (2016). *Fog computing: Principles, architectures, and applications*. Internet of Things, Elsevier.
- [14] Ateya A.A., Abd El-Latif A.A., Muthanna A., Volkov A., & Koucheryavy A. (2025). *Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks* (1st ed.). River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9788770046749>