

УДК 004.7
DOI: 10.25559/SITITO.16.202002.358-370

Аналитический обзор методов построения туманных вычислений

О. Н. Лоднева

ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия
400062, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 100
olodneva@yandex.ru

Аннотация

Интернет вещей (Internet of Things, IoT) – одно из самых быстроразвивающихся направлений инфокоммуникаций в настоящее время. IoT получил широкое распространение во многих сферах человеческой жизни: от систем безопасности и здравоохранения, до автоматизации промышленных объектов и управления логистикой. Системы Интернета вещей являются основным мотивационным аспектом для развития таких направлений как большие данные и их обработка. Так как IoT молодая концепция, то данных для реалистичного прогнозирования роста трафика таких систем и сетей крайне мало. Трафик IoT зависит от системы его генерирующей. Даже при наличии данных о трафике, создаваемом одним элементарным устройством, его нельзя описать строгой закономерностью. Нет статистических данных о часах наибольшей нагрузки, т. к. данный трафик агрегирует с прочими видами трафика, поступающими от сетей передачи данных. Иными словами, нет сценария моделирования. Чтобы прогнозирование было возможным и наиболее точным, необходимо рассмотреть, как работают интеллектуальные системы в целом, по какому принципу происходит обмен информацией внутри такой системы и вне ее. Для этого подлежат изучению применяемые методы обработки информации в IoT-системах – вычисления, а именно получившие широкое распространения, благодаря ограниченности вычислительных и транспортных ресурсов, туманные вычисления. Данное исследование будет состоять из нескольких частей, первая из которых включает в себя аналитический обзор методов построения туманных вычислений. Перспективой текущей работы в целом станет совмещение ее выводов с результатами предыдущего исследования трафика устройств Интернета вещей, результатом которого будет реалистичная модель прогнозирования нагрузки, оказываемой IoT-трафиком на сеть связи.

Ключевые слова: интернет вещей, туманные вычисления, интеллектуальные системы.

Для цитирования: Лоднева, О. Н. Аналитический обзор методов построения туманных вычислений / О. Н. Лоднева. – DOI 10.25559/SITITO.16.202002.358-370 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 358-370.

© Лоднева О. Н., 2020



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Analytical Review of Methods for Constructing Fog Computing

O. N. Lodneva

Volgograd State University, Volgograd, Russia
100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russia
olodneva@yandex.ru

Abstract

The Internet of Things (IoT) is one of the fastest growing areas of infocommunication at the moment. IoT is widely used in many areas of human life: from security and health systems, to automation of industrial facilities and logistics management. Internet of things systems are the main motivational aspect for the development of such areas as big data and its processing. Since IoT is a young concept, there is very little data for realistic forecasting of traffic growth in such systems and networks. IoT traffic depends on the system that generates it. Even if there is data about traffic generated by a single elementary device, it cannot be described by a strict pattern. There are no statistics on the hours of the highest load, because this traffic aggregates with other types of traffic coming from data networks. In other words, there is no simulation scenario. In order for forecasting to be possible and most accurate, it is necessary to consider how intelligent systems work in General, and how information is exchanged inside and outside of such a system. To do this, it is necessary to consider the methods of information processing used in IoT systems – these are computing, namely, fog computing that have become widespread due to the limited computing and transport resources. This study will consist of several parts, the first of which includes an analytical review of methods for constructing foggy calculations. The current work will be combined on the results of the previous study of device traffic Internet of things, which will result in a realistic model for predicting the load exerted by IoT traffic on the communication network.

Keywords: Internet of Things, fog Computing, Smart Systems.

For citation: Lodneva O.N. Analytical Review of Methods for Constructing Fog Computing. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2020; 16(2):358-370. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202002.358-370>



Введение

Internet of Things (IoT) – это связанная сеть вещей, в которой все узлы постоянно взаимодействуют друг с другом, автоматически координируясь для получения коллективных результатов, чтобы служить людям для улучшения качества жизни и экономического развития. IoT также обеспечивает связь между людьми и вещами для реализации «умной» среды: умных городов, транспортных систем, распределения энергии, медицинских услуг, отраслей промышленности, зданий и т.д. [1].

В среде Интернета вещей большие данные генерируются в каждый момент времени с датчиков, систем обмена сообщениями, мобильных устройств и социальных сетей, что приводит к новой форме сетевой архитектуры. Существует много технических сложностей, связанных со средой Интернета вещей, возникающих из-за ее распределенного, сложного и динамичного характера. Эти технические проблемы включают в себя подключение, мощность, стоимость, масштабируемость и надежность систем IoT [2].

Другой ключевой проблемой является обработка больших данных, которые поступают с различных узлов Интернета вещей. Как правило, для этих задач существует облако (центр обработки данных, ЦОД), но иногда невозможно передать все сгенерированные данные туда для обработки и хранения. Процесс отправки всех сгенерированных данных в облако занимает определенную полосу пропускания сети, а само облако не может обрабатывать приложения с минимальной задержкой из-за высокого времени отклика.

Обработка больших данных в среде тумана (туманные вычисления, Fog computing) – это новая вычислительная парадигма, которая приближает прикладные сервисы к пользователям с лучшим качеством обслуживания. Любое устройство, имеющее конвергентную инфраструктуру, может выступать в качестве узла Fog и предоставлять пользователям вычислительные, запоминающие и сетевые ресурсы. Туманные устройства также подключаются к облаку для сложной обработки и долгосрочного хранения данных, и эта вычислительная парадигма называется IoT-Fog-cloud framework, но первичную обработку и сжатие данных осуществляют узлы тумана, что существенно сокращает объем данных, передаваемый в последствии в облако.

В контексте предыдущих исследований по моделированию трафика устройств Интернета вещей [3-7] была выявлена проблема отсутствия структуры генерации и распределения трафика масштабных «умных» систем в сети. Ввиду этого необходимо рассмотреть подходы к построению взаимосвязей генератор-клиент-сервер, иначе говоря, рассмотреть принцип вычислительных систем, уделяя особое внимание туманным вычислениям как наиболее современным и активно развивающимся.

Облачные вычисления

Для определения понятия облачных вычислений обратимся к ГОСТу ISO/IEC 17788-2016: облачные вычисления (cloud computing) – это парадигма для предоставления возможности сетевого доступа к масштабируемому и эластичному пулу общих физических или виртуальных ресурсов с предоставлением самообслуживания и администрированием по требованию. Примеры ресурсов включают серверы, операционные системы, сети, программное обеспечение, приложения и оборудование для хранения данных¹.

Основными характеристиками, которыми обладают системы облачных вычислений и которые отличают их от других типов вычислений являются:

- самообслуживание по требованию. Потребитель по мере необходимости автоматически, без взаимодействия с каждым поставщиком услуг, может самостоятельно определять и изменять вычислительные мощности, такие как серверное время, объем хранилища данных;
- широкий или универсальный сетевой доступ. Вычислительные возможности доступны на большие расстояния по сети через стандартные протоколы и механизмы, что способствует широкому использованию разнородных платформ клиента и конечных устройств;
- объединение ресурсов. Конфигурируемые вычислительные ресурсы поставщика услуг объединены в единый пул для совместного использования распределенных ресурсов большим количеством потребителей;
- мгновенная эластичность ресурсов (мгновенная масштабируемость). Облачные услуги могут быстро предоставляться, расширяться, сжиматься и освобождаться исходя из потребностей клиента;
- измеримость услуг (учет потребляемых услуг и возможности оплаты услуг, которые были реально использованы). Облачные системы автоматически управляют и оптимизируют использование ресурсов за счет осуществления измерений на некотором уровне абстракции, соответствующей типу сервиса².

Предпосылки появления туманных и граничных вычислений

Взрывная генерация сенсорных данных

Из-за высоких темпов внедрения технологий Интернета вещей, генерация больших данных чрезмерно растет. Ожидается, что общее количество подключенных устройств во всем мире к 2025 году увеличится до 80 миллиардов. Также прогнозируется, что в 2025 году около 152 000 новых устройств будут подключаться к интернету каждую минуту³. Согласно отчету IDC, к 2020 году около 40% данных будет обрабатываться на границе сети. Отправка всех сгенерированных данных в облако не является рентабельной из-за затрат на связь и несовместимости объема данных и реальной емкости сетей связи. Следовательно, лучшим решением будет обработка сгенери-

¹ ГОСТ ISO/IEC 17788-2016 Информационные технологии (ИТ). Облачные вычисления. Общие положения и терминология. – М.: Стандартинформ, 2019.

² Ткаченко В. Облачные вычисления [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lessons-tva.info/archive/nov031.html> (дата обращения: 01.05.2020).

³ Kanellos M. 152,000 Smart Devices Every Minute In 2025: IDC Outlines The Future of Smart Things // Forbes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.com/sites/michaelkanellos/2016/03/03/152000-smart-devices-every-minute-in-2025-idc-outlines-the-future-of-smart-things/#40249d2b4b63> (дата обращения: 01.05.2020).



рованных данных рядом с пользователями.

Неэффективное использование пропускной способности сети

Некоторые приложения, например, системы видеонаблюдения, генерируют большой объем видеоданных. В связи с такими системами возникают два критических вопроса. Во-первых, если отправить все видеоданные в облако, они могут занять максимально доступную полосу пропускания. Во-вторых, обработка этих данных на границе также является сложной задачей, поскольку для этого требуется большое количество вычислительной мощности. Облако лучше всего подходит для обработки больших объемов данных, но проблема в том, что у нас нет неограниченной доступной полосы пропускания. Количество и сложность подобных систем будет возрастать с каждым днем, в то время как видеоданные важны для внедрения интеллектуальной системы мониторинга в умном городе. Таким образом, облако не является удобным способом для работы с приложениями, которые должны обрабатывать видеофайлы.

Временные задержки

Приложения, связанные с дополненной реальностью, онлайн-играми, умными домами и трафиком умных устройств, более чувствительны к задержке. Узлы тумана обычно расположены на расстоянии одного или двух переходов от пользователя. Следовательно, если концепция тумана используется для обработки больших данных на границе сети, она может легко поддерживать приложения с задержкой. В отличие от этого, облако расположено на расстоянии нескольких переходов, которое довольно далеко от пользователя. Задержка также влияет на онлайн-бизнес. Например, задержка в 100 мс может привести к снижению продаж Amazon на 1%, а задержка в 500 мс приведет к снижению трафика Google на 20% [8].

Информация о местоположении

Большинство приложений Интернета вещей зависят от контекста, что означает, что обработка приложений зависит от местоположения и других приложений, работающих поблизости. Отправка всех этих контекстно-зависимых запросов приложений в облако не является реалистичной и иногда недоступна из-за ограничений пропускной способности и задержки. Многие приложения IoT также требуют минимальных задержек обработки менее чем на несколько миллисекунд [9], таких как медицинские приложения, автомобильные сети, приложения управления беспилотными летательными аппаратами и системы реагирования на чрезвычайные ситуации. Такие приложения также требуют обработки данных в реальном времени. Эти типы прикладных служб всегда зависят от данных окружающей среды, а не от информации, доступной в других местах.

Осведомленность о местоположении также используется в интеллектуальных автомобильных приложениях для обнаружения структуры транспортного потока, такой как дорожные работы, блокпосты, пробки на дорогах, несчастные случаи. Эти приложения обмениваются информацией между подключенными транспортными средствами для улучшения навигации и управления движением транспортных средств [10]. В приведенном сценарии обработка и запуск приложений в облаке могут быть недостаточно эффективными из-за высокого времени отклика облака.

Туманные вычисления

Туманные вычисления (Fog computing) – это концепция распределенных вычислений, занимающих промежуточную позицию между облачными центрами обработки данных (ЦОД) и датчиками и устройствами, которые обычно являются частью сети Интернета вещей. Данный метод организации сети решает существующие проблемы приложений IoT и облачных систем [11].

Ключевые преимущества туманных вычислений:

- низкие задержки. Узлы туманных вычислений расположены географически ближе к конечному пользователю и могут обеспечить низкую задержку ответа на запрос;
- отсутствие проблем с пропускной способностью. Данные агрегируются в разных точках, поэтому нет необходимости отправлять их на центральный сервер через один канал и, соответственно, рассчитывать пропускную способность канала с такой точностью, которую требуют обычные облачные технологии;
- более высокий уровень безопасности по умолчанию. Данные в туманных вычислениях являются распределенными: они обрабатываются на большом количестве узлов в сложной распределенной системе. Подобное распределение данных позволяет повысить доступность сети и уменьшить количество данных теряемых в случае отказа одного узла. Малые размеры узлов дополнительно позволяют уменьшить размеры локальных резервных копий, что положительно сказывается на общей стоимости услуг. Также отсутствует необходимость пересылки их на длинные расстояния, что уменьшает риск перехвата или потери данных в процессе;
- энергоэффективность: распределенная нагрузка на устройства, входящие в состав сети, позволяет увеличить время их амортизации;
- масштабируемость. Учитывая специфику туманных вычислений, использующихся особенно широко в сетях Интернета вещей, можно с уверенностью сказать, что количество входящих в сеть устройств постоянно растет. Обработка данных ближе к краю сети снижает нагрузку на центральные сервера, тем самым упрощая масштабирование систем. Подобная «модульная» структура позволяет провайдеру расширять свою клиентскую базу без значительных вложений в центральную инфраструктуру.

Ограниченные ресурсы туманного устройства

Туманные устройства, используемые для вычислений, имеют ограниченные ресурсы для обработки данных, по сравнению с облаком. Однако большие данные могут обрабатываться на этих устройствах путем создания кластеров тумана.

Google ввел концепцию map-reduce для обработки огромных объемов данных внутри кластера с использованием большого числа устройств, обладающих некоторой вычислительной мощностью. Любое устройство, имеющее вычислительные возможности, может выступать в качестве туманного устройства, от пользовательских девайсов до всех видов устройств сетевого управления. Как правило, эти устройства имеют свои собственные операционные системы и приложения, которые занимают большую часть системных ресурсов. Запуск приложений тумана на этих устройствах всегда является вторым



приоритетом. Таким образом, эффективная и интеллектуальная политика распределения задач обеспечивает защиту от большого числа сбоев⁴.

Ограничение мощности

Любое устройство, которое обрабатывает, хранит и отправляет данные в сеть, может являться частью тумана. Следовательно, мобильные устройства с автономным питанием, такие как ноутбуки, смартфоны и планшеты, могут выступать в качестве устройства тумана [12-13]. Энергия этих устройств ограничена, и из-за этого устройство может отключиться от низкого уровня заряда во время вычислений. Как следствие, задачи, выполнявшиеся до отключения питания, должны быть перенесены на другое устройство. Таким образом, планировщик может знать о наличии питания перед распределением задачи на мобильное устройство.

Также, многие типы сенсорных устройств питаются от батарей, и эти батареи следует часто перезаряжать/менять. Это серьезная проблема в некоторых случаях, например, сенсорные сети тела, которые контролируют состояние пациентов. В таких сценариях используются энергоэффективные методы, включая первичную аналитику данных, что позволит сократить их объем [14].

Подключение

Большинство устройств Fog и IoT подключены с помощью беспроводной связи, которая наиболее подвержена помехам и затуханиям. Эти проблемы вызывают колебания пропуск-

ной способности сети доступа. Кроме того, в туманной среде тысячи устройств и датчиков сосуществуют и постоянно взаимодействуют друг с другом. Количество подключенных устройств будет увеличиваться с течением времени. Чтобы решить эту проблему, крайне важно разработать эффективную модель вычислительной системы, которая может оценить количество подключенных устройств в пределах тумана и обеспечить включение ресурсов до отказа системы.

Граничные вычисления

Подходы туманных и граничных вычислений близки, однако имеют отличия. В то время, как в туманных информационных системах вычисления производятся в узле недалеко от места сбора данных, граничные позволяют обрабатывать данные там же, где они получены, что позволяет обеспечить мгновенный отклик. Это связано с тем, что в граничных вычислениях используется программируемый логический контроллер (PLC), который может входить в систему управления производственными процессами (MES). Он осуществляет контроль за рядом периферийных устройств и имеет возможность практически мгновенно реагировать на полученные с них данные. Однако в каждом случае такой контроллер должен быть настроен индивидуально.

Выводы

Для сравнения описанных выше особенностей вычислительных сетей в таблицах 1 и 2 приведены основные характеристики туманных, облачных и граничных вычислений.

Таблица 1. Сравнение характеристик облачных и туманных вычислений
Table 1. Comparison of characteristics of cloud and fog computing

Параметры	Облачные вычисления	Туманные вычисления
Задержки	Высокие	Низкие
Расположение узлов	В Интернете	На периферии сети
Расстояние между клиентом и сервером	Множественные переходы	Один или несколько переходов
Известно ли место расположения данных	Нет	Да
Географическое распределение	Централизованное	Децентрализованное или централизованное по сегментам
Тип подключения	Выделенная линия	Беспроводное соединение
Аппаратное обеспечение	Значительные и масштабируемые память и вычислительные мощности	Ограниченная память и вычислительные мощности
Условия эксплуатации	Большие здания с хорошей системой кондиционирования	На улице или внутри неспециализированных помещений

Таблица 2. Сравнение характеристик туманных и граничных вычислений
Table 2. Comparison of characteristics of fog and edge computing

Параметры	Туманные вычисления	Граничные вычисления
Устройства в узлах	Маршрутизаторы, коммутаторы, точки доступа, шлюзы	Сервера базовых станций
Расположение узлов	Между конечными устройствами и облаком	Программируемый логический контроллер, базовая станция
Расстояние между клиентом и сервером	Один или несколько переходов	Один переход
Механизмы доступа	Bluetooth, Wi-Fi, мобильные сети	Мобильные сети
Скорость реагирования	Средняя	Высокая

⁴ Cisco Fog Computing Solutions: Unleash the Power of the Internet of Things [Электронный ресурс]. URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/trends/iot/docs/computing-solutions.pdf (дата обращения: 01.05.2020).



Методы построения туманных вычислений. Логическая реализация

Под методом в контексте данной научной статьи будет пониматься совокупность блоков – факторов, каждый из которых отражает программное и аппаратное исполнение системы туманных вычислений. Иными словами, так как туманные вычисления (Fog computing) являются относительно новой концепцией, то не существует единой эталонной модели реализации тумана. Многие исследователи в данной области приводят свои идеи построения и моделей, которые направлены на реализацию Fog в той или иной области IoT.

Определений данной концепции также существует несколько. Таким образом А.А. Дворников в своей статье «Платформа туманных вычислений на основе беспроводных сенсорных сетей» определяет Fog, как вычислительный процесс, выполняющийся на оборудовании, имеющем непосредственный контакт с физической средой и доступ к серверам облачных вычислений.

С точки зрения архитектуры вычислительных сетей, туманные вычисления – это слой, расположенный между облачными вычислениями и физическим миром – источником информации и объектом управления [15-16].

Вермесан О., Фрисс П. в докладе «Internet of things-from research and innovation to market deployment» [2] называют туманные вычисления расширением облака (Micro Cloud), которое предназначено для специфических нужд некоторых приложений устройств IoT. Авторы определяют следующие требования к туманным вычислениям:

- низкая латентность;
- осведомленность о местоположении;
- широкое географическое распределение;
- мобильность;
- очень большое количество узлов;
- преобладающая роль беспроводного доступа;
- сильное присутствие потоковых приложений и приложений реального времени;
- неоднородность [2].

В общем случае, туманные вычисления – это расширение облачных вычислений, до границ сети. Первоочередная задача туманных вычислений заключается в снижении вычислительной нагрузки на облако путем предварительной обработки больших данных, генерируемых сетью устройств: датчиков, камер, интеллектуальных систем домов, городов, предприятий.

Модели построения туманных вычислений

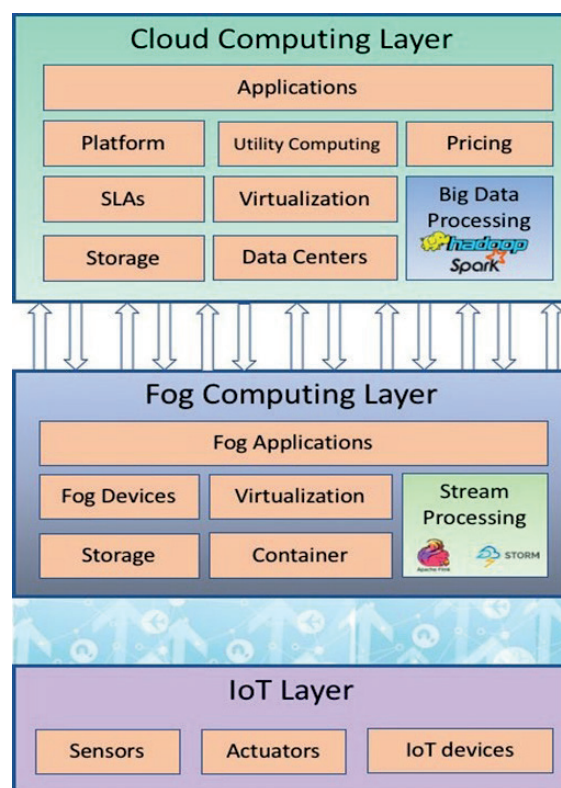
Туманные вычисления предназначены для развертывания распределенным способом, где обработка выполняется пограничными устройствами. Облачные вычисления - это более централизованная концепция. В тумане устройства обработки и хранения данных расположены в непосредственной близости по сравнению с облаком, и это является причиной того, что туман более способен обеспечивать предоставление услуг с низкой задержкой (с учетом задержки через точки доступа, смартфоны, базовые станции, коммутаторы, серверы и маршрутизаторы). Кроме того, дополненная реальность, потоковое видео, игры и любая другая интеллектуальная система связи также требуют временных вычислений. Каждая из перечис-

ленных систем генерирует большой объем данных, который нерентабельно отправлять в облако для последующей обработки.

Существующие исследования по архитектуре туманных вычислений

Поскольку туманные вычисления появились недавно, то для данной парадигмы до сих пор не существует стандартной архитектуры. В нескольких исследованиях [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24] были предложены различные архитектуры туманных вычислений.

В [25] уровень тумана был определен как распределенный интеллект, который находится между базовой сетью и сенсорными устройствами. Бономи и др. также указывают на несколько характеристик, которые делают туман нетривиальным расширением облачных вычислений. Эти характеристики включают граничное расположение, низкую задержку, массивную сенсорную сеть, очень большое количество узлов, поддержку мобильности, взаимодействие в реальном времени, доминирующую беспроводную связь, совместимость, распределенное развертывание, оперативную аналитику и взаимодействие с облаком. Схема модели [25] представлена на рисунке 1.



Р и с. 1. Схема взаимодействия уровня тумана с облаком и конечными устройствами [26, с. 3]

Fig. 1. The scheme of interaction of the fog level with the cloud and end devices [26, p. 3]

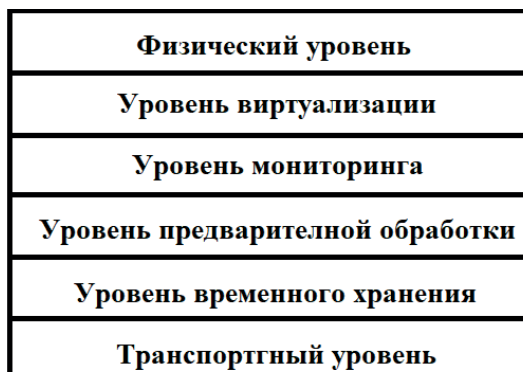
Различные исследователи предлагают несколько типов архитектуры, таких как многоуровневая, иерархическая и сетевая, для Fog, как описано ниже.



Архитектуры туманных вычислений

Многоуровневая архитектура тумана

Аазам и др. [17] представили многоуровневую архитектуру Fog, где были показаны шесть различных слоев (рис. 2). Физические и виртуальные узлы, а также датчики обслуживаются в соответствии с требованиями нижних уровней, известных как физический уровень и уровень виртуализации. Следующий верхний уровень – это уровень мониторинга, который отслеживает деятельность сети и базового узла. Этот уровень определяет, когда и какая задача должна быть выполнена каким узлом. Этот же уровень контролирует потребление энергии для устройств или узлов с ограничениями. Над уровнем мониторинга расположен уровень предварительной обработки, который выполняет связанные с управлением данными задачи для получения необходимых и более значимых данных. После этого данные временно хранятся в ресурсах тумана на следующем верхнем уровне, известном как уровень временного хранения. Самый верхний - транспортный уровень загружает предварительно обработанные и защищенные данные в облако. Таким образом, большая часть обработки будет выполняться в среде тумана и позволит облаку иметь дело с более сложными службами. Как только обработанные данные загружаются в облако, они удаляются с локального носителя данных. Для частных данных уровень безопасности обеспечивается конфиденциальностью, шифрованием и целостностью соответствующих услуг.



Р и с. 2. Архитектура туманных вычислений
F i g. 2. Fog computing architecture

Аркиан и др. [18] предложили четыре уровня архитектуры тумана:

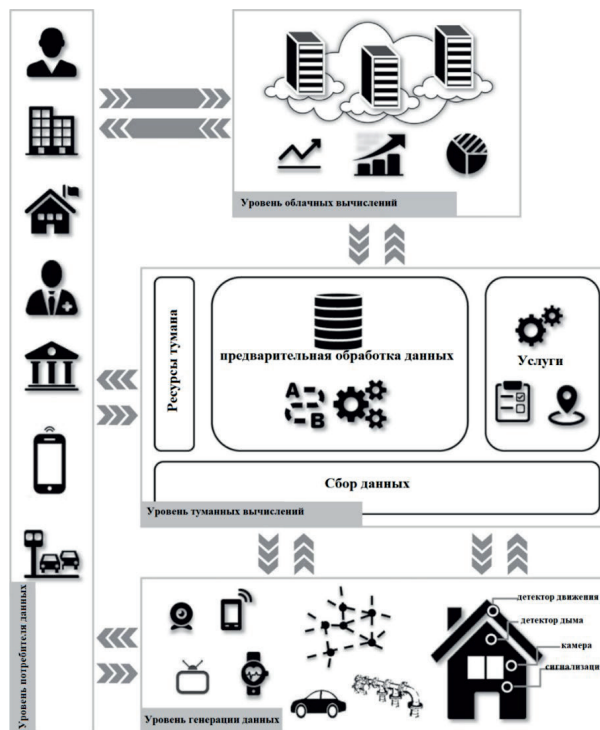
1. уровень генерирования данных;
2. уровень облачных вычислений;
3. уровень туманных вычислений;
4. уровень потребителя данных.

Их графическое представление изображено на рис. 5.

На уровне потребителей данных рассматривается широкий круг потребителей – от частных лиц до предприятий. Потребители могут отправлять свои запросы на три других уровня и получать необходимые услуги.

Уровень генератора данных – это то место, где находятся IoT-системы, которые связываются со слоем облачных вычислений через слой туманных вычислений. В этой архитектуре предварительная обработка данных будет выполняться

на уровне Fog. Этот уровень также обеспечивает осведомленность о контексте и низкую задержку. Уровень облачных вычислений обеспечивает централизованное управление и широкий спектр услуг мониторинга. Ключевым отличием этой архитектуры от других вышеописанных является прямая связь между потребителями и всеми тремя слоями.

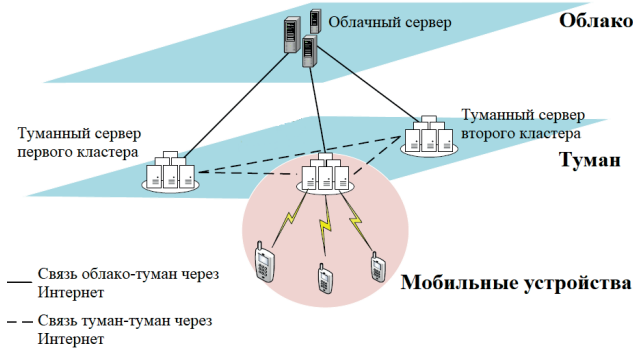


Р и с. 3. Архитектура вычислительной сети по [18, с. 155]
F i g. 3. Computer network architecture according to [18, p. 155]

Слой тумана представлен как промежуточный слой между мобильными устройствами и облаком в архитектуре системы тумана Луана TX. и соавторов [19] (рис. 4). Согласно этой архитектуре, основным компонентом слоя тумана является сервер тумана, который должен быть развернут в фиксированном месте на локальных площадках мобильных пользователей. Туманный сервер может быть существующим сетевым компонентом, таким как базовая станция или точка доступа Wi-Fi. Эти серверы взаимодействуют с мобильными устройствами через беспроводные соединения и предоставляют им предварительно определенные службы приложений в своем беспроводном покрытии, не обращая за помощью к облаку или другим серверам тумана. Эта системная архитектура не учитывает многие другие аспекты, но раскрывает идею сервера тумана.

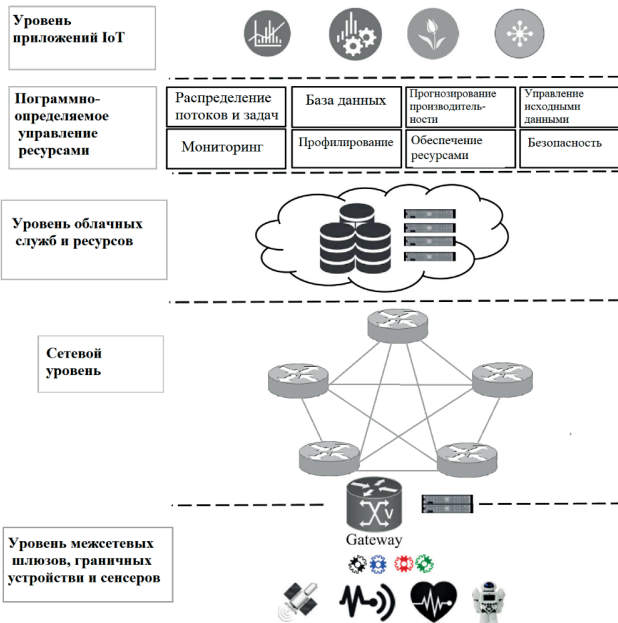
Дастджерди и соавторы в [20] представили пятиуровневую эталонную архитектуру туманных вычислений (рис. 5). Самый верхний – это уровень приложений IoT, который предоставляет конечным пользователям возможно-определяемый уровень управления ресурсами, который занимается вопросами мониторинга, обеспечения, безопасности и управления. За ним идет уровень, отвечающий за управление облачными службами и ресурсами.





Р и с. 4. Архитектура вычислительной сети мобильных устройств [19, с. 6]
F i g. 4. The architecture of the computer network of mobile devices [19, p. 6]

Далее – сетевой уровень, который поддерживает связь между всеми устройствами и облаком. Самый нижний уровень состоит из конечных устройств, таких как датчики, граничные устройства и шлюзы. Он включает в себя некоторые приложения. Они работают, улучшая функциональность устройства. В этой эталонной архитектуре слой тумана полностью отсутствует, и он также не свидетельствует о том, где выполняется вычисление.

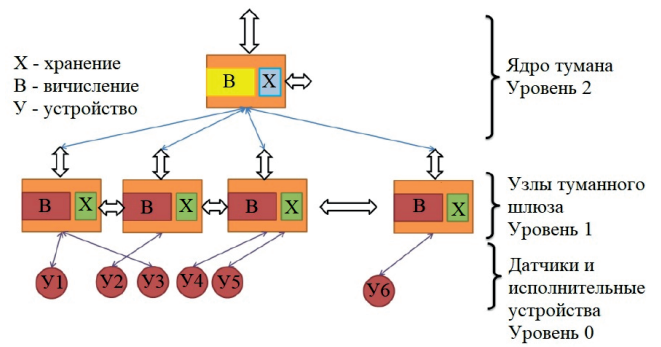


Р и с. 5. Эталонная архитектура туманных вычислений [20, с. 65]
F i g. 5. The reference architecture of fog computing [20, p. 65]

Иерархические модели туманных вычислений

Джанг и соавторы [21] представили иерархическую архитектуру тумана, основанную на разделении туманных устройств на три различных типа: пограничные устройства, вычислительные узлы и узлы ввода-вывода. Пограничные узлы выполняют первичную обработку данных. Узлы ввода-вывода

являются генераторами данных в системе, но имеют ограниченные вычислительные ресурсы, поэтому поддерживают непрерывную связь с пограничными узлами. Облачные узлы обладают большими вычислительными мощностями и являются динамическими с программируемой средой выполнения. Эти три типа узлов могут быть реализованы как отдельно, так и вместе, на основе требований к конструируемой системе. Концептуальная иерархическая архитектура туманных вычислений представлена Хоссейн Ф. и соавторы [22] (рис. 6), где уровень туманных вычислений разделен на три подуровня и может быть расширен. Вычисления и хранение данных выполняются на всех уровнях, кроме самого нижнего. Уровень 0 состоит из датчиков и исполнительных механизмов, уровень 1 называется узлом туманного шлюза, а уровень 2 представляет основные узлы тумана.



Р и с. 6. Иерархическая модель архитектуры туманных вычислений [21]
F i g. 6. Hierarchical model of fog computing architecture [21]

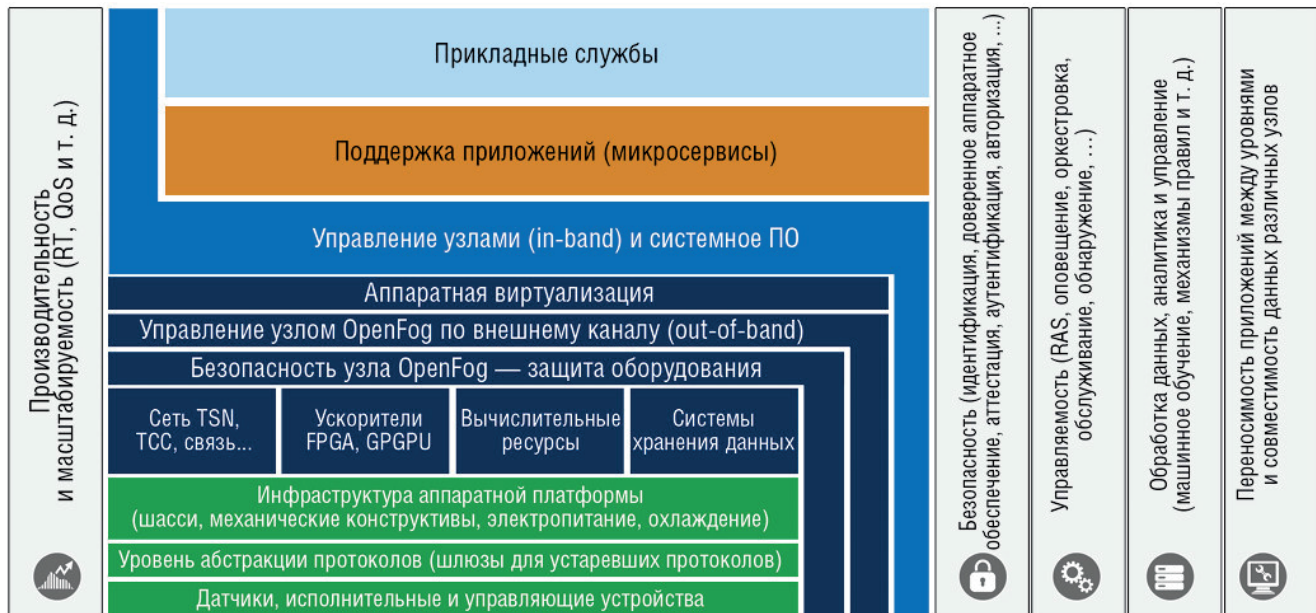
Архитектура OpenFog

Объяснение архитектуры OpenFog является наиболее полным. Оно было дано в научной работе «OpenFog Architecture Overview» группы исследователей Group OCAW⁵. В OpenFog рассмотрены основные характеристики туманных вычислений. Однако эта архитектура не учитывает возможности хранения данных рядом с конечными пользователями. Она предназначена для выполнения вычислений в непосредственной близости от клиента, чтобы минимизировать задержку, затраты на передачу и другие связанные с сетью условия наряду с требованиями к пропускной способности. Элементы управления, включая возможность конфигурации и контроль доступа, а также сетевые измерения, развертываются вблизи конечной точки, а не управляются из шлюза. Кроме того, предлагаемая архитектура позволяет осуществлять сбор и обработку данных с использованием локальной аналитики, а результаты безопасно копируются в облако для дальнейших обработки и использования.

Состав и конфигурация уровней данной архитектуры схематично изображены на рисунке 7.

⁵ OpenFog Reference Architecture for Fog Computing. OPFRA001.020817. – OpenFog Consortium, USA, 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iiconsortium.org/pdf/OpenFog_Reference_Architecture_2_09_17.pdf (дата обращения: 01.05.2020).



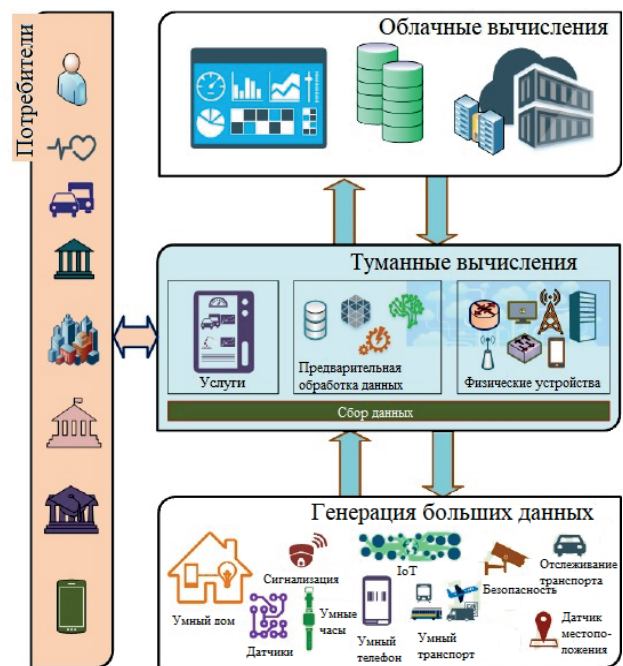


Р и с. 7. Открытая архитектура туманных вычислений (OpenFog) [23, с. 44]

F i g. 7. Open architecture of fog computing (OpenFog) [23, p. 44]

Архитектура IFCIoT

Интегрированная архитектура IoT-облака или тумана (IFCIoT) была предложена Муниром и соавторами в [24]. Эта архитектура позволяет использовать интегрированные облачные службы для устройств Интернета вещей через промежуточную инфраструктуру fog. Объединенное облако формируется несколькими внешними и внутренними облачными серверами, которые соответствуют потребностям приложений и бизнеса. Шлюзовые устройства, интеллектуальные маршрутизаторы, пограничные серверы и базовые станции являются узлами тумана, и большая часть обработки происходит в них. Узлы тумана автономны; таким образом, каждый узел может обеспечить непрерывное обслуживание своих поставщиков данных. Все развертывание вычислительной среды fog может быть локальным в случае автоматизации отдельных офисных зданий, а также может быть распределено на региональном уровне, включая локальные уровни в случае крупных коммерческих компаний, расположенных в нескольких зданиях в различных местах. Эта архитектура поддерживает распределенное развертывание и передачу информации с различных уровней в централизованную систему. Подключение всех устройств IoT считается беспроводным подключением через WLAN, WiMAX и другие сотовые сети. Туманные узлы поддерживают соединение с устройствами IoT в пределах своего беспроводного диапазона. Весь туман подключен к интегрированной облачной службе через основную сеть. Для совместной обработки система тумана может быть подключена к другим туманам по беспроводной сети.



Р и с. 8. Архитектура IFCIoT [26, с. 7]

F i g. 8. IFCIoT architecture [26, p. 7]



Из рисунка 8 видно, что данная архитектура похожа по составу на архитектуру, предложенную Аркиан и соавторами в [18]. Главным отличием последней от IFCIoT является то, что в IFCIoT конечный пользователь имеет непосредственный доступ только к среде туманных вычислений, через которую связывается с облачными сервисами и периферийными устройствами-вещами.

Выводы

В данной научной работе метод построения понимается как совокупность программных и аппаратных средств, принципов построения (архитектур), а также платформ, предназначенных для развертывания вычислительной сети. Для удобства сравнения и выбора оптимального варианта, характеристики рассмотренных выше архитектур сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Особенности различных архитектур

Table 3. Features of different architectures

Авторы работ	Физический уровень	Уровень виртуализации	Туманные серверы	Мониторинг	Энерго эффективность	Предварительная обработка	Временное хранение	Безопасность	Хранение в облаке	Масштабируемость	Автономность	Программируемость
Аазам и соавт.	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Луан и соавт.	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Джанг и соавт.	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Дастжери и соавт.	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Группа OSAW	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Аркиан и соавт.	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Мунир и соавт.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗

Также, в некоторых из рассмотренных работ были приведены имитационные модели вычислительной системы на основе предложенных архитектур. Информация о них представлена в таблице 4.

Таблица 4. Модели на основе архитектур туманных вычислений

Table 4. Models based on fog computing architectures

Авторы работ	Предложенная модель	Используемые инструменты моделирования	Исследуемые показатели
Аазам и соавт.	Управление ресурсами интернета вещей на основе тумана	CloudSim 3.0.3	Прогнозирование ресурсов, распределение ресурсов и ценообразование
Джанг и соавт.	Программирование распределенных потоков данных (DDF)	Не упомянут	Не упомянут
Дастжери и соавт.	Запросы для обнаружения инцидентов	CloudSim	Средняя задержка, использование ресурсов основной сети
Аркиан и соавт.	Экономически эффективное распределение ресурсов	Не упомянут	Задержка обслуживания, энергопотребление, стоимость



Заключение

Туманные вычисления – это новая технология, которая разработана для решения проблем выполнения приложений Big Data IoT путем обработки непрерывно генерируемых данных на границе сети. Эта вычислительная парадигма является высокопотенциальной моделью вычислительной сети, которая быстро развивается.

Главной причиной возникновения Fog стал Интернет вещей, в котором имеет место большое количество связанных сенсорных сетей, генерирующих большие данные. С нынешней скоростью развития IoT, трафик этих сетей существенно нагружает существующие телекоммуникационные сети. Его обработка занимает существенный объем производительности ЦОДов. Это приводит к задержкам, ошибкам и отказам во многих чувствительных ко времени откликах приложениях.

Туманные вычисления на данный момент – это возможность фильтровать и существенно уменьшать трафик сенсорных сетей перед отправкой в облако. В перспективе часть обработки больших данных должна перейти на уровень тумана, что максимально сократит время задержки.

Выбор метода построения интеллектуальной вычислительной сети не может быть фиксированным из-за большой разницы сфер применения таких сетей. Таким образом необходимо рассматривать развертывание вычислительной сети как совокупность идущих друг за другом блоков. Каждый блок решает свою задачу: определение требований, выбор архитектуры, выбор программного и аппаратного оснащения.

Список использованных источников

- [1] Профрансов, Д. Ю. К вопросу о туманных вычислениях и Интернете вещей / Д. Ю. Профрансов, И. Е. Сафонова. – DOI 10.21777/2500-2112-2017-4-30-39 // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 4. – С. 30-39. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32324694> (дата обращения: 01.05.2020). – Рез. англ.
- [2] Vermesan, O. Internet of Things Applications: From Research and Innovation to Market Deployment / O. Vermesan, P. Friess. – River Publishers, 2014.
- [3] Лоднева, О. Н. Анализ трафика устройств Интернета вещей / О. Н. Лоднева, Е. П. Ромасевич. – DOI 10.25559/SITITO.14.201801.149-169 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 149-169. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35050057> (дата обращения: 01.05.2020). – Рез. англ.
- [4] Лоднева, О. Н. Имитационное моделирование трафика устройств Интернета вещей / О. Н. Лоднева // Современные информационные технологии и ИТ-образование / Под ред. В. А. Сухомлина, сборник трудов межд. конференции. – М.: Макс Пресс, 2019. – С. 71-83. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38581952> (дата обращения: 01.05.2020).
- [5] Bellavista, P. A survey on fog computing for the Internet of Things / P. Bellavista, J. Berrocal, A. Corradi, S. K. Das, L. Foschini, A. Zanni. – DOI 10.1016/j.pmcj.2018.12.007 // Pervasive and Mobile Computing. – 2019. – Vol. 52. – Pp. 71-99. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119218301111> (дата обращения: 01.05.2020).
- [6] Rahmani, A. Fog Computing in the Internet of Things: Intelligence at the Edge / A. Rahmani, P. Liljeberg, J.-S. Preden, A. Jantsch (ed.) – DOI 10.1007/978-3-319-57639-8 – Springer International Publishing, 2018. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-57639-8> (дата обращения: 01.05.2020).
- [7] Alli, A. A. The fog cloud of things: A survey on concepts, architecture, standards, tools, and applications / A. A. Alli, M. M. Alam. – DOI 10.1016/j.iot.2020.100177 // Internet of Things. – 2020. – Vol. 9. – Article number: 100177. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660520300172> (дата обращения: 01.05.2020).
- [8] Greenberg, A. Networking the Cloud / A. Greenberg. – DOI 10.1109/ICDCS.2009.86 // 2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. – Montreal, QC, 2009. – Pp. 264-264. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5158433> (дата обращения: 01.05.2020).
- [9] Zhang, Y. A Survey on Emerging Computing Paradigms for Big Data / Y. Zhang, J. Ren, J. Liu, C. Xu, H. Guo, Y. Liu. – DOI 10.1049/cje.2016.11.016 // Chinese Journal of Electronics. – 2017. – Vol. 26, Issue 1. – Pp. 1-12. – URL: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/cje.2016.11.016> (дата обращения: 01.05.2020).
- [10] Koldehofe, B. Moving range queries in distributed complex event processing / B. Koldehofe, B. Ottenwälder, K. Rothermel, U. Ramachandran. – DOI 10.1145/2335484.2335507 // Proceedings of the 6th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems (DEBS '12). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2012. – Pp. 201-212. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2335484.2335507> (дата обращения: 01.05.2020).
- [11] Ganti, R. K. Mobile crowdsensing: current state and future challenges / R. K. Ganti, F. Ye, H. Lei. – DOI 10.1109/MCOM.2011.6069707 // IEEE Communications Magazine. – 2011. – Vol. 49, No. 11. – Pp. 32-39. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6069707> (дата обращения: 01.05.2020).
- [12] Concone, F. SMCP: a Secure Mobile Crowdsensing Protocol for fog-based applications / F. Concone, G. Lo Re, M. Morana. – DOI 10.1186/s13673-020-00232-y // Human-centric Computing and Information Sciences. – 2020. – Vol. 10. – Article number: 28. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13673-020-00232-y> (дата обращения: 01.05.2020).
- [13] Naha, R. K. Fog Computing: survey of trends, architectures, requirements, and research directions / R. K. Naha, S. Garg, D. Georgakopoulos, P. P. Jayaraman, L. Gao, Y. Xiang, R. Ranjan. – DOI 10.1109/ACCESS.2018.2866491 // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – Pp. 47980-48009. – URL: <https://eprints.utas.edu.au/29470> (дата обращения: 01.05.2020).
- [14] Dubey, H. Fog Data: Enhancing Telehealth Big Data Through Fog Computing / H. Dubey, J. Yang, N. Constant, A. M. Amiri, Q. Yang, K. Makodiya. – DOI 10.1145/2818869.2818889 // Proceedings of the ASE BigData & SocialInformatics 2015 (ASE BD&SI '15). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2015. – Article 14. – Pp. 1-6. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2818869.2818889> (дата обращения: 01.05.2020).
- [15] Дворников, А. А. Платформа туманных вычислений



- на основе беспроводных сенсорных сетей / А. А. Дворников // Качество. Инновации. Образование. – 2014. – № 8. – С. 64-70. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22305434> (дата обращения: 01.05.2020). – Рез. англ.
- [16] Castillo-Cara, M. FROG: A Robust and Green Wireless Sensor Node for Fog Computing Platforms / M. Castillo-Cara, E. Huaranga-Junco, M. Quispe-Montesinos, L. Orozco-Barbosa, E. A. Antúnez. – DOI 10.1155/2018/3406858 // Journal of Sensors. – 2018. – Vol. 2018. – Article number: 3406858. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/js/2018/3406858> (дата обращения: 01.05.2020).
- [17] Aazam, M. Fog Computing Micro Datacenter Based Dynamic Resource Estimation and Pricing Model for IoT / M. Aazam, E. Huh. – DOI 10.1109/AINA.2015.254 // 2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. – Gwangju, 2015. – Pp. 687-694. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7098039> (дата обращения: 01.05.2020).
- [18] Arkian, H. R. MIST: Fog-based data analytics scheme with cost-efficient resource provisioning for IoT crowdsensing applications / H. R. Arkian, A. Diyanat, A. Pourkhalili. – DOI 10.1016/j.jnca.2017.01.012 // Journal of Network and Computer Applications. – 2017. – Vol. 82. – Pp. 152-165. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804517300188> (дата обращения: 01.05.2020).
- [19] Luan, T. H. Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge / T. H. Luan, L. Gao, Z. Li, Y. Xiang, G. Wei, L. Sun // arXiv:1502.01815. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1502.01815> (дата обращения: 01.05.2020).
- [20] Dastjerdi, A. V. Fog computing: Principles, architectures, and applications / V. A. Dastjerdi, H. Gupta, R. N. Calheiros, S. K. Ghosh, R. Buyya // Internet of Things: Principle & Paradigms; R. Buyya, A. Dastjerdi (ed.) Morgan Kaufmann, Burlington, Massachusetts, USA, 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1601.02752> (дата обращения: 01.05.2020).
- [21] Giang, N. K. Developing IoT applications in the Fog: A Distributed Dataflow approach / N. K. Giang, M. Blackstock, R. Lea, V. C. M. Leung. – DOI 10.1109/IOT.2015.7356560 // 2015 5th International Conference on the Internet of Things (IoT). – Seoul, 2015. – Pp. 155-162. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7356560> (дата обращения: 01.05.2020).
- [22] Hosseinpour, F. An Approach for Smart Management of Big Data in the Fog Computing Context / F. Hosseinpour, J. Plosila, H. Tenhunen. – DOI 10.1109/CloudCom.2016.0080 // 2016 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). – Luxembourg City, 2016. – Pp. 468-471. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7830721> (дата обращения: 01.05.2020).
- [23] Mostafavi, S. Fog Computing Architectures, Privacy and Security Solutions / S. Mostafavi, W. Shafik. – DOI 10.22385/jctecs.v24i0.292 // Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science. – 2019. – Vol. 24. – Pp. 1-14. – URL: <https://www.ojs.jctecs.com/index.php/com/article/view/292> (дата обращения: 01.05.2020).
- [24] Munir, A. IFCIoT: Integrated Fog Cloud IoT: A novel architectural paradigm for the future Internet of Things / A. Munir, P. Kansakar, S. U. Khan. – DOI 10.1109/MCE.2017.2684981 // IEEE Consumer Electronics Magazine. – 2017. – Vol. 6, No. 3. – Pp. 74-82. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7948854> (дата обращения: 01.05.2020).
- [25] Bonomi, F. Fog computing and its role in the internet of things / F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, S. Addepalli. – DOI 10.1145/2342509.2342513 // Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing (MCC '12). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2012. – Pp. 13-16. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2342509.2342513> (дата обращения: 01.05.2020).
- [26] Naha, R. K. Fog-computing architecture: survey and challenges / R. K. Naha, S. Garg, A. Chan. – DOI 10.1049/PB-PC025E_ch10 // Big Data-Enabled Internet of Things; M. U. S. Khan, S. U. Khan, A. Y. Zomaya (ed.). – The Institution of Engineering and Technology, 2019.

Поступила 01.05.2020; принята к публикации 20.08.2020;
опубликована онлайн 30.09.2020.

Об авторе:

Лоднева Ольга Николаевна, студент кафедры телекоммуникационных систем, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (400062, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 100), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1362-9054>, olodneva@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Proferansov D.Yu., Safonova I.E. To the Question of Fog Computing and the Internet of Things. *Obrazovatel'nye resursy i tehnologii*. 2017; (4):30-39. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21777/2500-2112-2017-4-30-39>
- [2] Vermesan O., Friess P. Internet of Things Applications: From Research and Innovation to Market Deployment. River Publishers; 2014. (In Eng.)
- [3] Lodneva O.N., Romasevich E.P. Analysis of Devices Traffic of the Internet of Things. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018; 14(1):149-169. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.149-169>
- [4] Lodneva O.N. Simulation of Devices Traffic the Internet of Things. In: Sukhomlin V.A. (ed.) *Proceedings of the XIII International Scientific Conference Modern Information Technologies and IT-Education*. Maks Press, Moscow; 2019. p. 71-83. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38581952> (accessed 01.05.2020). (In Eng., abstract in Russ.)
- [5] Bellavista P., Berrocal J., Corradi A., Das S.K., Foschini L., Zanni A. A survey on fog computing for the Internet of Things. *Pervasive and Mobile Computing*. 2019; 52:71-99. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.12.007>
- [6] Rahmani A., Liljeberg P., Preden J.-S., Jantsch A. (ed.) Fog Computing in the Internet of Things: Intelligence at the Edge. Springer International Publishing, 2018. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57639-8>



- [7] Alli A.A., Alam M.M. The fog cloud of things: A survey on concepts, architecture, standards, tools, and applications. *Internet of Things*. 2020; 9:100177. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100177>
- [8] Greenberg A. Networking the Cloud. In: *2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*. Montreal, QC; 2009. p. 264-264. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2009.86>
- [9] Zhang Y., Ren J., Liu J., Xu C., Guo H., Liu Y. A Survey on Emerging Computing Paradigms for Big Data. *Chinese Journal of Electronics*. 2017; 26(1):1-12. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1049/cje.2016.11.016>
- [10] Koldehofe B., Ottenwalder B., Rothermel K., Ramachandran U. Moving range queries in distributed complex event processing. In: *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems (DEBS '12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2012. p. 201-212. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/2335484.2335507>
- [11] Ganti R.K., Ye F., Lei H. Mobile crowdsensing: current state and future challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2011; 49(11):32-39. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.6069707>
- [12] Concone F., Lo Re G., Morana M. SMCP: a Secure Mobile Crowdsensing Protocol for fog-based applications. *Human-centric Computing and Information Sciences*. 2020; 10:28. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00232-y>
- [13] Naha R.K., Garg S., Georgakopoulos D., Jayaraman P.P., Gao L., Xiang Y., Ranjan R. Fog Computing: survey of trends, architectures, requirements, and research directions. *IEEE Access*. 2018; 6:47980-48009. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2866491>
- [14] Dubey H., Yang J., Constant N., Amiri A.M., Yang Q., Makodiyaya K. Fog Data: Enhancing Telehealth Big Data Through Fog Computing. In: *Proceedings of the ASE BigData & Social Informatics 2015 (ASE BD&SI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2015. Article 14. p. 1-6. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/2818869.2818889>
- [15] Dvornikov A.A. Fog Computing Platform Based On Wireless Sensor Networks. *Quality. Innovation. Education*. 2014; (8):64-70. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22305434> (accessed 01.05.2020). (In Eng., abstract in Russ.)
- [16] Castillo-Cara M., Huaranga-Junco E., Quispe-Montesinos M., Orozco-Barbosa L., Antunez E.A. FROG: A Robust and Green Wireless Sensor Node for Fog Computing Platforms. *Journal of Sensors*. 2018; 2018:3406858. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3406858>
- [17] Aazam M., Huh E. Fog Computing Micro Datacenter Based Dynamic Resource Estimation and Pricing Model for IoT. *2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Gwangju, 2015. p. 687-694. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/AINA.2015.254>
- [18] Arkian H.R., Diyanat A., Pourkhalili A. MIST: Fog-based data analytics scheme with cost-efficient resource provisioning for IoT crowdsensing applications. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017; 82:152-165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.01.012>
- [19] Luan T.H., Gao L., Li Z., Xiang Y., Wei G., Sun L. Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge. *arXiv:1502.01815*. 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1502.01815> (accessed 01.05.2020). (In Eng.)
- [20] Dastjerdi A.V., Gupta H., Calheiros R.N., Ghosh S.K., Buyya R. Fog computing: Principles, architectures, and applications. In: Buyya R., Dastjerdi A. (ed.) *Internet of Things: Principle & Paradigms*. Morgan Kaufmann, Burlington, Massachusetts, USA; 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1601.02752> (accessed 01.05.2020). (In Eng.)
- [21] Giang N.K., Blackstock M., Lea R., Leung V.C.M. Developing IoT applications in the Fog: A Distributed Dataflow approach. In: *2015 5th International Conference on the Internet of Things (IoT)*. Seoul; 2015. p. 155-162. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/IOT.2015.7356560>
- [22] Hosseinpour F., Plosila J., Tenhunen H. An Approach for Smart Management of Big Data in the Fog Computing Context. In: *2016 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*. Luxembourg City; 2016. p. 468-471. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CloudCom.2016.0080>
- [23] Mostafavi S., Shafik W. Fog Computing Architectures, Privacy and Security Solutions. *Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science*. 2019; 24:1-14. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22385/jctecs.v24i0.292>
- [24] Munir A., Kansakar P., Khan S.U. IFCIoT: Integrated Fog Cloud IoT: A novel architectural paradigm for the future Internet of Things. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2017; 6(3):74-82. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684981>
- [25] Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. Fog computing and its role in the internet of things. In: *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing (MCC '12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2012. p. 13-16. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/2342509.2342513>
- [26] Naha R.K., Garg S., Chan A. Fog-computing architecture: survey and challenges. In: Khan M.U.S., Khan S.U., Zomaya A.Y. *Big Data-Enabled Internet of Things*. The Institution of Engineering and Technology; 2019. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1049/PBPC025E_ch10

Submitted 01.05.2020; revised 20.08.2020;
published online 30.09.2020.

About the author:

Olga N. Lodneva, student of the Department of Telecommunication systems, Volgograd State University (100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1362-9054>, olodneva@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.

