

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.Пинчук, директор ООО "НТЦ ПРОТЕЙ",

Н.Соколов, д.т.н., директор по науке ООО "ПРОТЕЙ СпецТехника",

В.Фрейнкман, директор по маркетингу и системным исследованиям ООО "НТЦ ПРОТЕЙ"

УДК 621.391

Рассматриваются концептуальные положения туманных вычислений с точки зрения требований к сетям электросвязи, поддерживающим соответствующие функциональные возможности. Это – первая статья авторов, входящая в цикл публикаций, посвященных туманным вычислениям. Она содержит четыре раздела: краткое изложение истории развития туманных вычислений; системно-сетевые аспекты реализации концепции туманных вычислений; общие принципы реализации исследуемой концепции; прогностические оценки развития туманных вычислений.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Термин "туманные вычисления" (Fog Computing, Fog Networking, Fogging) стал использоваться в технической литературе не так давно [1, 2] – примерно с 2012 года. Само явление, как объект исследования, известно более сорока лет [3] по разным названиям, среди которых чаще встречается словосочетание "распределенные вычислительные системы". Возникновение нового названия обусловлено, в том числе, и качественными отличиями туманных вычислений от предшествующих системных и технических решений. Выбор нового термина был продиктован названием альтернативной и – одновременно – взаимодополняющей концепцией "облачных вычислений" [4, 5]. Облако, в общем случае, находится вдали от устройства, для которого необходимо обработать информацию, а туман – поблизости.

Историю развития туманных вычислений можно описать, введя основные этапы доминирования разных решений для постоянно протекающего процесса "централизация – децентрализация". Эти этапы показаны на рисунке 1. Предлагаемая иллюстрация характерна для сложных систем любого вида [6]. Рассматриваемый пример касается эволюции вычислительных средств [1-5] и сопутствующего развития телекоммуникационных сетей как сложных систем [7].

На первом этапе используются счетные палочки (или подобные им средства), которые считаются одним из первых приспособлений для проведения элементарных вычислений. Очевидно, что для передачи информации о полученных результатах телекоммуникационные сети не использовались ввиду их отсутствия. На втором этапе появились механические вычислительные средства (например, арифмометр), а позже – калькуляторы. Насущная необходимость в сетях передачи данных еще не возникла. Для обмена результатами пользователей вполне устраивали сети телеграфной и телефонной связи. Первый и второй этапы уместно рассматривать как процессы децентрализованной обработки информации.

На третьем этапе стали доступны ресурсы электронных вычислительных машин (ЭВМ). Для обмена информацией потребовались сети передачи данных. Этот этап, пожалуй, стал первым процессом централизации обработки информации.

На четвертом этапе появились персональные компьютеры. Сформировалась также информационная система Интернет [8], обеспечивающая наряду с другими сетями обмен данными большого объема. Преобладали стали процессы децентрализованной обработки информации.

На пятом этапе возросла роль ряда информационных технологий вида Big Data [9] и Data Mining

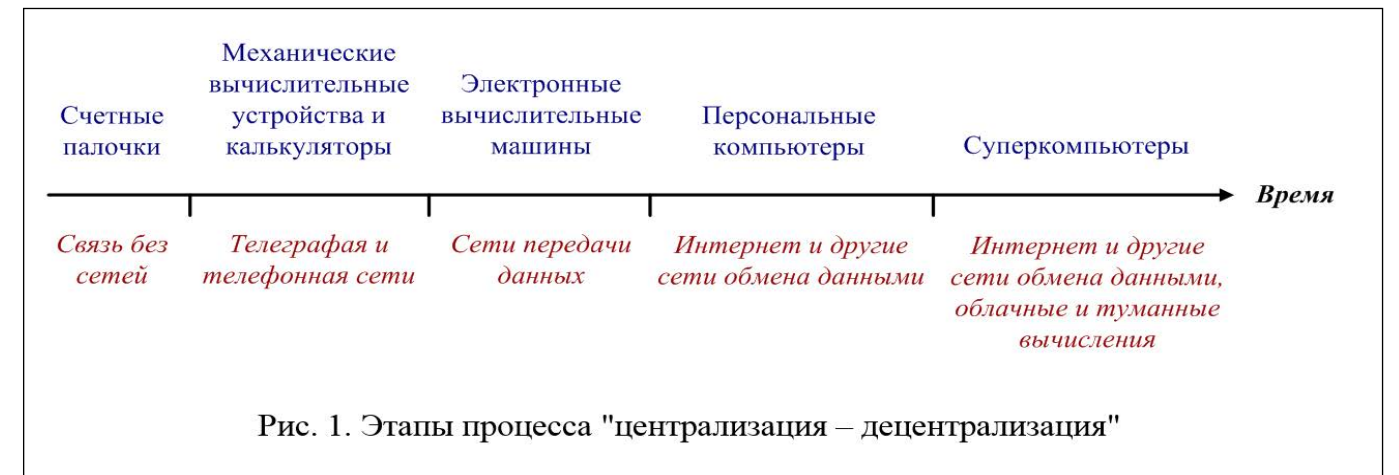


Рис. 1. Этапы процесса "централизация – децентрализация"

[10] – большие данные и извлечение ценной информации. Они привели к использованию суперкомпьютеров и центров обработки данных (ЦОД). Вместе с тем, формирование рынка IoT [11] – Интернета вещей – стимулировало определенный консенсус в связке "централизация – децентрализация". Именно на пятом этапе возникли и укоренились термины "облачные вычисления" и "туманные вычисления".

Концепция туманных вычислений начала превращаться в реальность благодаря трем факторам. Во-первых, вычислительные мощности терминального оборудования и устройств, размещаемых в "тумане", позволяют выполнять дополнительные вычисления без возникновения каких-либо проблем. Во-вторых, количество терминалов растет очень быстро, и эта тенденция сохранится в обозримой перспективе. В-третьих, целесообразно разгрузить централизованные системы (в том числе облачные) от лишней работы. При этом большинство периферийных устройств и систем построено на базе относительно стандартных архитектур и использует типовые операционные системы, что позволяет загружать на них дополнительное программное обеспечение.

СИСТЕМНО-СЕТЕВЫЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ "ТУМАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ"

Важная особенность туманных вычислений заключается в оптимальном приближении тех устройств, которые осуществляют решение поставленных задач к источнику и/или потребителю информации. Актуальность концепции "туманных вычислений" уместно объяснить на простом примере: необходимо передать информацию, обработать ее, что требует времени T, и получить результат до истечения срока Z. Пусть известна среда

передачи информации, которая определяет время распространения сигналов γ на единицу длины. Предположим, что информация имеет небольшой объем и передается с высокой скоростью. Тогда формула, позволяющая оценить допустимое расстояние между источником/приемником информации и вычислительным устройством L, определяется очевидным образом:

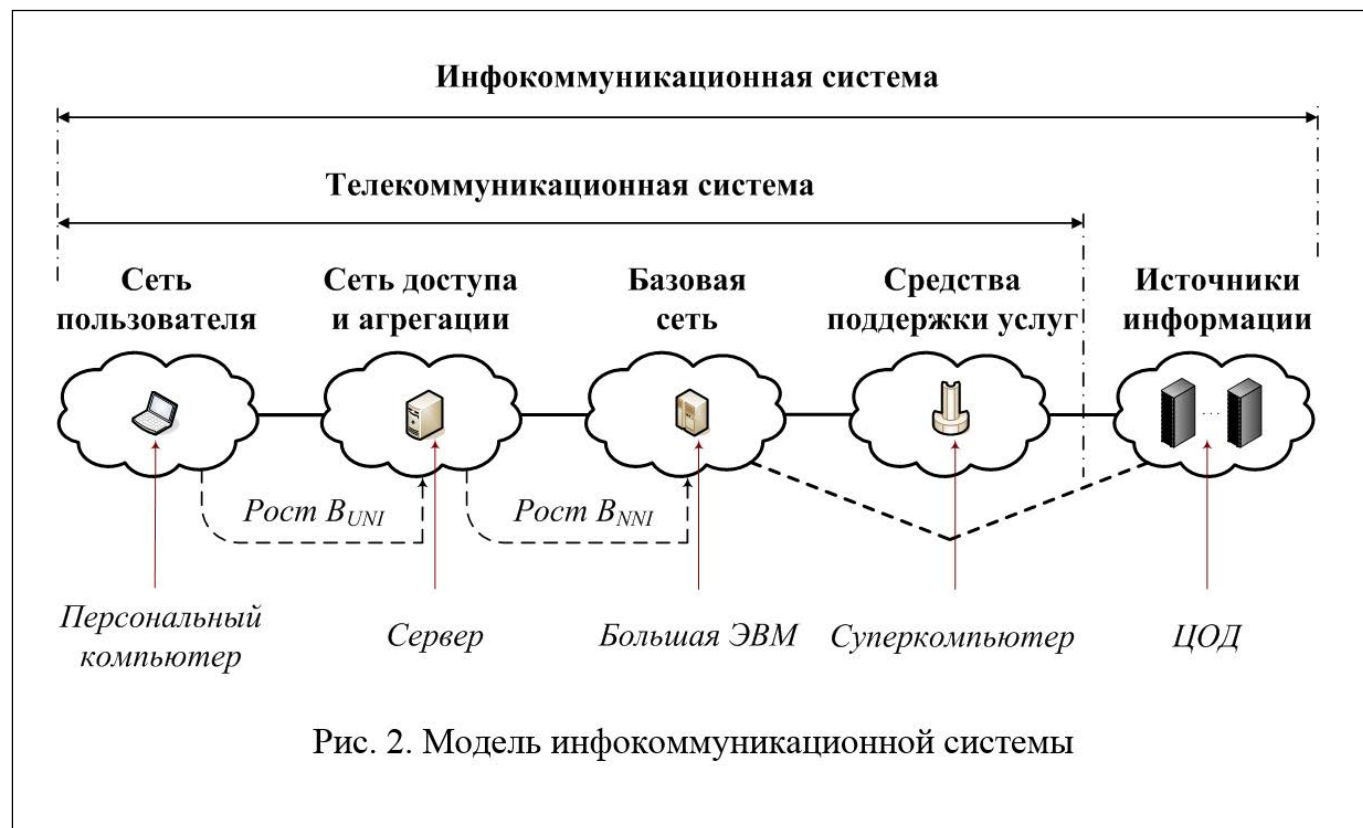
$$2\gamma L + T = Z \rightarrow L = \frac{Z - T}{2\gamma} \quad (1)$$

Ряд вычислений требуют сравнительно простых операций. При высокой производительности вычислительных устройств величиной T можно пренебречь. В этом случае для оценки допустимого расстояния L приемлемо приближенной соотношение:

$$L = \frac{Z}{2\gamma} \quad (2)$$

Следовательно, для услуг и приложений, ориентированных на быстрое получение ответа (минимальные значения Z) величина L не может быть такой, чтобы осуществлять обработку информации в "облаке". Пусть значение γ является типовым для оптического волокна – 5 мкс/км. Если, например, необходимо получить результат за 0,1 мс, то величина L, как следует из соотношения (2), не должна превышать 10 км. Это означает, что вычисление следует выполнять либо в самом источнике информации, либо в устройстве, которое расположено в границах сетей доступа или агрегации [12, 13].

На рисунке 2 приведена модель инфокоммуникационной системы, составленная на основании положений, которые приведены в рекомендациях

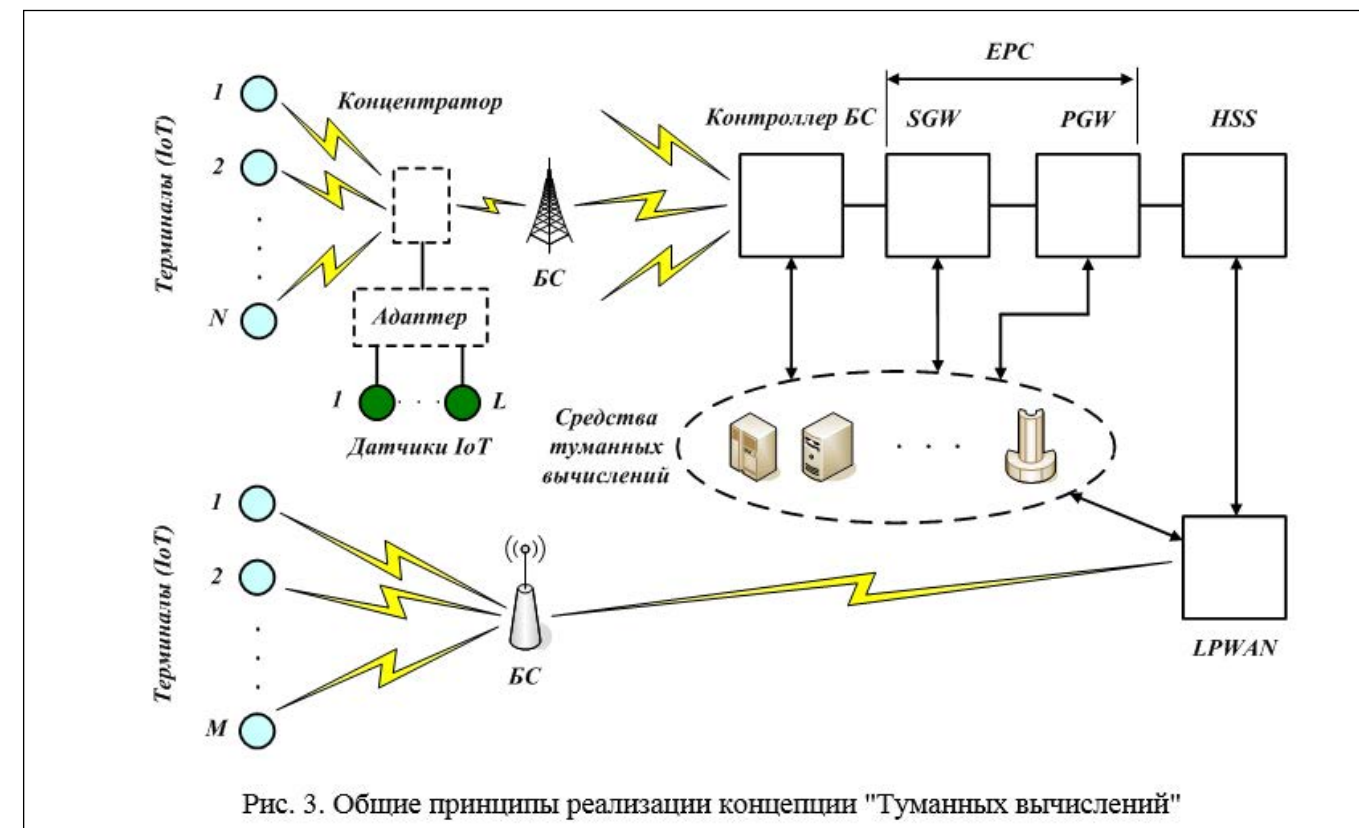


сектора стандартизации Международного союза электросвязи (МСЭ) серии Y. Модель включает пять основных элементов, причем четыре из них образуют телекоммуникационную систему. Виды размещаемых вычислительных устройств по элементам модели выбраны условно, но весьма близки к практике.

Для телекоммуникационной системы любого рода важную роль играют интерфейсы двух видов: пользователь-сеть (User-Networks Interface, UNI); сеть-сеть (Network-Network Interface, NNI). Скорости обмена данными на этих интерфейсах обозначены на рис.2 как V_{UNI} и V_{NNI} соответственно. Общность тенденций эволюции для инфокоммуникационных систем любого рода состоит в постоянном росте величин V_{UNI} и V_{NNI} . Практическая реализация концепций "Интернет вещей" и "Туманные вычисления" также стимулирует рост величин V_{UNI} и V_{NNI} . Иная ситуация может сложиться с пропускной способностью транспортных ресурсов в других элементах рассматриваемой модели. Данное утверждение основано на том, что значительный объем данных станет обрабатываться в непосредственной близости от источников/приемников информации - в "тумане". Это разгрузит такие элементы, как большая ЭВМ, суперкомпьютер и ЦОД.

В качестве основной сети доступа для "Интернета вещей" рассматриваются средства мобильной связи поколений 4G и 5G [14, 15], хотя на практике выбор вариантов ее построения заметно шире. В частности, радиointерфейс на участке от "вещи" до ближайшего элемента сети может быть организован с использованием различных технологий; ими могут быть Bluetooth, LoRA и т.д.

Поколение 4G известно также по аббревиатуре LTE - Long-Term Evolution. Причем для "Интернета вещей" в настоящее время рекомендуется спецификация NB-LTE - узкополосный (Narrow Band) вариант [16]. Именно эта спецификация рассматривается в настоящее время как наилучшим образом ориентированная на поддержку "Интернета вещей", поскольку в краткосрочной и, возможно, среднесрочной перспективе наибольшее число вещей, которые будут подключены к интернету - это разного рода сенсоры и датчики, количество которых потенциально очень велико, но при этом такого рода вещи генерируют небольшие объемы трафика. По этой причине появилась аббревиатура NB-IoT - узкополосный Интернет вещей. Он представляет собой сеть, оптимизированную для обслуживания большого количества устройств, использующих для обмена информацией узкополосные тракты. При



этом в перспективе, с появлением широкополосных потребителей трафика (беспилотный транспорт, управление транспортными потоками, телемедицина) не исключено использование весьма существенных транспортных ресурсов для реализации концепции "Интернет вещей" [17] по причине необходимости передавать большие объемы видеoinформации, а также сообщения, связанные с тактильными ощущениями [18], а это значит, что вместо NB-IoT на участке радиодоступа надо будет использовать более широкополосные технологии, такие как 5G.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ "ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ"

Возможности туманных вычислений будут использоваться различными терминалами, но основную их часть составляют устройства IoT, подключаемые за счет беспроводных технологий. Тем не менее, уже используются (в ограниченном объеме) датчики IoT, подключаемые кабельными линиями. Они могут использовать вычислительные ресурсы за счет установки специально разработанных адаптеров, включаемых в концентраторы нагрузки (или входящих в их состав). Целесообразность применения концентраторов - предмет отдельного технико-экономического исследования,

результаты которого не влияют на концептуальные положения туманных вычислений.

Помимо базовых станций (BC - base station) и их контроллеров (base station controller) для реализации туманных вычислений используется ряд технических средств, основные из которых перечислены ниже [2, 16, 19, 20]:

- блок SGW (Serving Gateway - обслуживающий шлюз) выполняет функции взаимодействия между сетью доступа, которая заканчивается в контроллере BC, и ядром сети LTE;
- блок PGW (Packet data network Gateway - шлюз для сетевой пакетной передачи данных) выполняет функции сопряжения с другими сетями передачи различного назначения;
- аппаратно-программные средства EPC (Evolved Packet Core - функционально дополненное пакетное ядро сети) представляют собой образованную, в основном, блоками SGW и PGW базовую сеть оператора связи;
- блок HSS (Home Subscriber Server - сервер абонентских данных) выполняет функции регистров и иного оборудования (в частности, HLR, VLR, AUC, EIR), которые применялись в сетях мобильной связи второго и третьего поколения;
- аппаратно-программные средства LPWAN (Low-power Wide-area Network - сеть большого радиуса

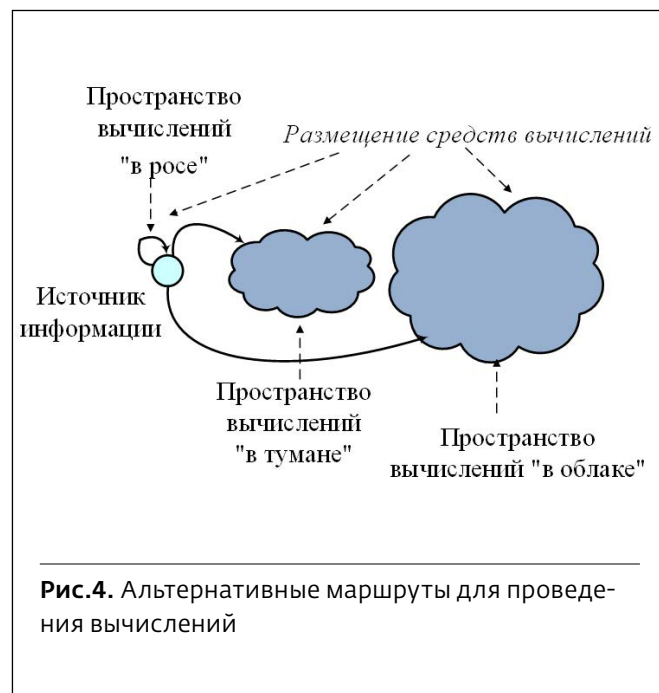


Рис.4. Альтернативные маршруты для проведения вычислений

действия с низким потреблением энергии) представляет собой специализированную систему обмена данными небольшого объема для различных приложений IoT.

Общие принципы реализации концепции "Туманных вычислений" показаны на рисунке 3. Он иллюстрирует два альтернативных варианта проведения туманных вычислений. В ряде случаев эти варианты могут использоваться как взаимодополняющие решения, позволяющие обеспечить высокую надежность выполнения необходимых операций.

Технические средства, обеспечивающие функции доступа в заранее заданном частотном диапазоне, объединяют упомянутое выше понятие LTE. В некоторых технических документах совокупность LTE и EPS рассматривается как функционально дополненная пакетная система связи - EPS (Evolved Packet System). Технические средства, выполняющие туманные вычисления, показаны в границах овала, нарисованного пунктирной линией. Доступ ко всем вычислительным ресурсам осуществляется при помощи различных аппаратно-программных средств.

Вариант организации туманных вычислений, изображенный в верхней части предложенной модели, следует считать основным. Он обеспечивает обслуживание основной доли трафика, способен предоставлять широкий спектр дополнительных услуг, а также нацелен на развитие туманных вычислений в соответствии с ведущими

тенденциями эволюции инфокоммуникационной системы, определяемыми, в свою очередь, процессами модернизации экономики и социальной сферы.

Вариант организации туманных вычислений, представленный в нижней части рассматриваемой модели, позволяет предоставить некоторые виды услуг до реализации полноценного сценария по их организации. Речь в основном идет о решении частных задач, возникающих в отдельных сферах жилищно-коммунального хозяйства и в некоторых промышленных предприятиях. Кроме того, организация сети класса LPWAN может стать средством резервирования для обеспечения более высоких показателей надежности для сравнительно малочисленной группы пользователей.

Оценка транспортных ресурсов, необходимых для реализации туманных вычислений, представляет собой предмет отдельных исследований. При их проведении должны быть определены также и транспортные ресурсы, необходимые для резервирования с целью обеспечения заданных показателей надежности, которые устанавливаются в соглашении об уровне обслуживания SLA (Service Level Agreement). По всей видимости, в ряде SLA потребуется обеспечение коэффициента готовности K_T на уровне порядка 0,99999 - величине, которая определяется правилом "пять девяток" [13].

Показатели качества обслуживания QoS (Quality of Service) мультисервисного трафика, представленного в виде совокупности IP-пакетов, нормируются на основе методологии, которая предложена МСЭ в рекомендациях серии Y. Для стандарта LTE дополнительно определены девять классов идентификаторов качества обслуживания QCI (QoS Class Identifier). Каждому идентификатору QCI поставлен в соответствие свой уровень приоритета на обслуживание, а также нормированы допустимая задержка и вероятность потери IP-пакетов.

Следует выделить еще одно направление в развитии вычислений с точки зрения пространства их применения - Dew Computing. Это словосочетание трактуется как вычисления "в росе" или "в капле" (рис.4). Каждое из трех пространств используется для решения различных задач, образуя единую вычислительную систему. При этом возможны операции по взаимному использованию доступных ресурсов, если это позволяет повысить качество предоставления услуг.

Пространство вычислений "в росе" включает выполнение необходимых операций в самом оконечном устройстве класса IoT или в терминале, расположенном в нескольких метрах от него. При

Количество созданных данных по категориям с 2011 по 2020 год

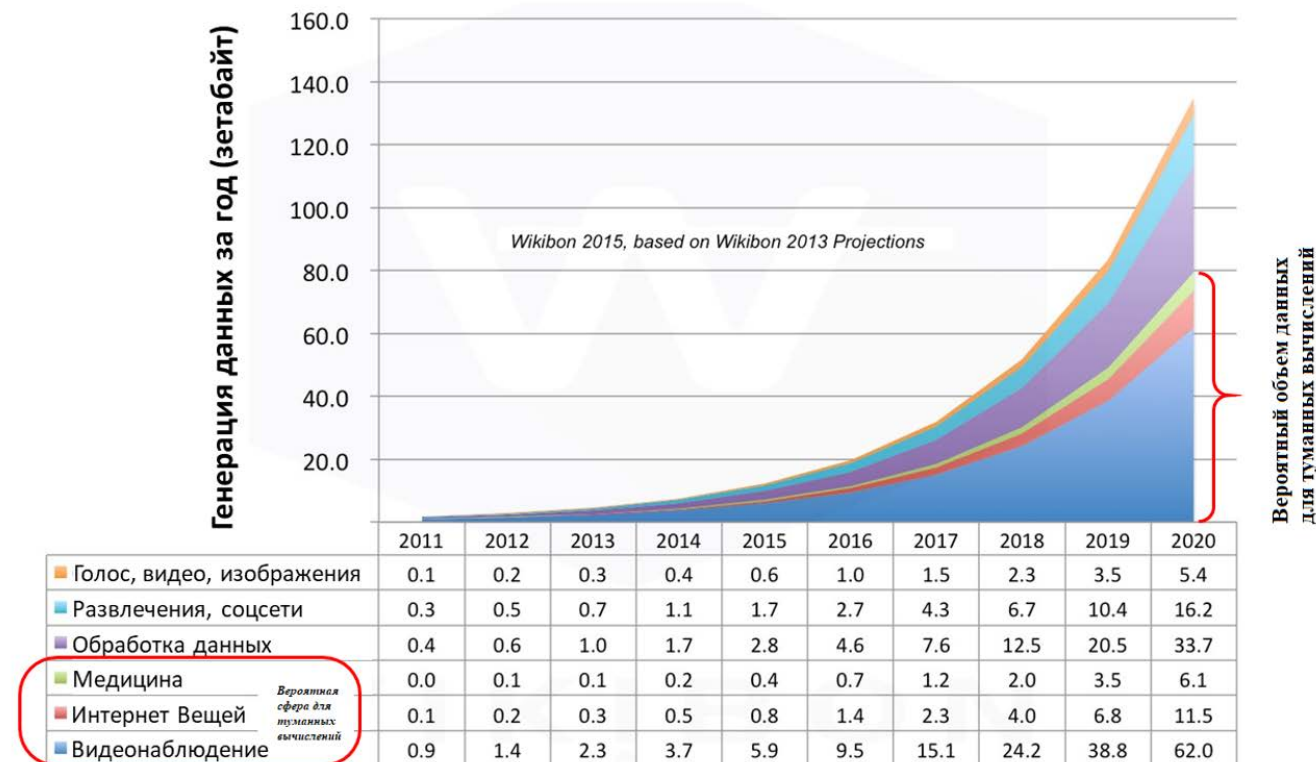


Рис.5. Объем данных, относящихся к туманным вычислениям

этом программное обеспечение может предварительно закачиваться "в росу" из тумана или облака. Туда же могут быть направлены результаты вычислений, что подчеркивают линии с односторонними стрелками. Информационное взаимодействие росы, тумана и облака определяется характером решаемых задач, постановка которых может меняться в широких пределах. По этой причине следует разработать совокупность сценариев информационных взаимодействий, при помощи которых можно оценить область изменения требований к вычислительным ресурсам. Эта область требований позволит, в свою очередь, оценить необходимые транспортные ресурсы и производительность средств коммутации (маршрутизаторов IP-пакетов).

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ПО РАЗВИТИЮ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Количественным и качественным прогнозам, касающимся развития туманных вычислений, свойственна низкая достоверность. Данное

утверждение характерно для большей части инноваций, создаваемых в области высоких технологий по мере приближения к точке сингулярности [21]. По этой причине прогностические оценки уместно рассматривать, например, при помощи "окна Овертона" [17]. Это позволяет сопровождать прогнозируемые оцениваемые численные значения и вербальные утверждения оценками, которые могут задаваться утверждениями следующего вида [22]: разумно, приемлемо, немыслимо. Подобная методология позволяет использовать сценарный подход [23], учитывающий даже маловероятные (на первый взгляд) направления в развитии исследуемого процесса или объекта. Утверждения трех перечисленных видов образуют пессимистический, прагматический и оптимистический сценарии соответственно. Для получения численных оценок потенциальных пользователей логично опираться на результаты, приведенные в [17, 24]:

- к 2020 году в мире будет функционировать порядка 7 трлн устройств, что примерно на три

порядка больше численности населения нашей планеты;

- уровень насыщения Интернет-вещами в мире на отдаленную перспективу составит порядка 100 трлн объектов различной природы;
- необходимые (реально используемые, а не декларированные провайдерами услуг широкополосного доступа) скорости обмена данными через интерфейс пользователь-сеть на отдаленную перспективу для пессимистического, прагматического и оптимистического сценариев развития инфокоммуникационной системы составят (для суммарного трафика людей и вещей) 100 Мбит/с, 1 Гбит/с и 10 Гбит/с соответственно.

Очевидно, что количество Интернет-вещей будет неравномерно распределено по странам с разным уровнем развития. Если в качестве упрощающего допущения не принимать во внимание это обстоятельство, то с учетом доли населения Российской Федерации в общей численности жителей Земного шара получаем, что к концу 2020 года в Российской Федерации количество Интернет-вещей может возрасти до 150 млрд. В качестве уровня насыщения может быть использован порог, равный 2 трлн. Оценки, приведенные выше для скорости обмена данными, не меняются.

Полученные результаты в значительной мере базируются на прогнозах, отражающих мнение энтузиастов концепции Интернета вещей. По этой причине их следует рассматривать как оценки, присущие оптимистическому сценарию. Для получения практически интересных оценок уместно использовать информацию, полученную путем анкетирования группы экспертов. Итоги предварительного опроса, в котором, правда, участвовала небольшая группа специалистов, позволяют предположить, что наиболее вероятная величина количества Интернет-вещей к 2020 году в Российской Федерации составит 1 млрд.

Очевидно, что не все Интернет-вещи будут использовать технологии туманных вычислений. По этой причине количество Интернет-вещей, подключенных ко всемирной паутине, к 2020 году в Российской Федерации вряд ли превысит 0,5 млрд.

Представляют практический интерес и прогностические оценки, касающиеся объема данных, относящихся к сфере туманных вычислений. Сообщество практиков и консультантов по телекоммуникационным и информационным технологиям Wikibon [25] предлагает делить трафик по объему генерируемых данных на следующие категории:

- голос, видео, изображения;
- развлечения, социальные сети;
- обработка данных;
- медицина;
- Интернет вещей;
- видеонаблюдение.

Самый быстрый рост объема создаваемых данных в последние годы наблюдается, по оценкам сообщества Wikibon, в трех последних секторах (по той классификации, которая приведена выше). Именно эти сектора образуют вероятную сферу применения технологии туманных вычислений, что показано на рисунке 5. Отметим, что данные прогностические оценки были опубликованы три года назад, а само исследование началось еще раньше. В ближайшее время могут появиться уточняющие статистические данные, но тенденции, показанные на рис.5, по всей видимости, не изменятся.

Следует подчеркнуть, что долгосрочным прогнозам всегда свойственна невысокая достоверность. Применительно к туманным вычислениям существует дополнительный фактор снижения достоверности прогностических оценок, связанный с возможными технологическими инновациями, которые способны существенно изменить уровни спроса и предложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S.** Fog computing and its role in the internet of things. – Proceedings of the first edition of the MC. workshop on Mobile cloud computing. 2012. pp. 13-16.
2. **Chiang M., Balasubramanian B., Bonomi F.** Fog for 5G and IoT. – Wiley, 2017, 305 p.
3. **Глушков В.М., Калинин Л.А., Лазарев В.Г., Сифоров В.И.** Сети ЭВМ. – М.: Связь, 1977. 280 с.
4. Риз Дж. Облачные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург. 2011. 288 с.
5. **Шалагинов А.В.** Генезис и будущее облачных вычислений, или досужие размышления о "третьем глазе". – ИКС. 2015. №9-10. С. 60-63.
6. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. – М.: Наука. 1978. 400 с.
7. **Efimov V.V., Sokolov N.A.** The Public Communication Network Development as the Process of Complex System Evolution. – Proceedings of the FRUCT'18 Saint-Petersburg, Russia, April 2016 ITMO University, Saint-Petersburg, Russia. FRUC. Oy, Finland, pp. 449-455.
8. **Кейс С.** Третья волна интернета. Какими качествами должен обладать предприниматель будущего. – М.: Эксмо. 2017. 192 с.

9. **Erl T., Khattak W., Buhler P.** Big Data Fundamentals: Concepts, Drivers & Techniques. – Prentice Hall, 2015, 218 p.
10. **Han J., Kamber M., Pei J.** Data Mining. Concept and Techniques. – Morgan Kaufmann Publishers, 2011, 703 p.
11. **Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю., Самсонов М.Ю.** Интернет вещей. – Самара: ПГУТИ, ООО "Издательство Ас Гард". 2014. 340 с.
12. **Lopez V., Velasco L.** Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control. – Springer, 2016, 299 p.
13. **Соколов Н.А.** Задачи планирования сетей электросвязи. – СПб.: Техника связи. 2012. 432 с.
14. Cloud and Fog Computing in 5G Mobile Networks. Emerging advances and applications. Edited by **Markakis E., Mastorakis G., Mavromoustakis C.X., Pallis E.** – The Institution of Engineering and Technology, 2017, 438 p.
15. Fog for 5G and IoT. Edited by **Hsing T.R., Lau V.K.N., Chiang M.** – Wiley, 2017, 288 p.
16. **Landström S., Bergström J., Westerberg E., Hammarwall D.** NB-IoT: a sustainable technology for connecting billions of devices. – Ericsson technology review, 2016, №3, 12 p.

17. **Соколов Н.А.** Сценарии реализации концепции "Интернет вещей" // Первая миля. 2016. №4. С. 50-54.
18. **Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Киричек Р.В.** Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. №1. С. 44-46.
19. **Dahlman E., Parkvall S., Skold J.** 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Third Edition 3rd Edition. – Academic Press, 2016, 616 p.
20. **Metsälä E., Salmelin J.** LTE Backhaul: Planning and Optimization, 1st Edition. – Wiley, 2015, 304 p.
21. **Панов А.Д.** Сингулярная точка истории // Общественные науки и современность. 2005. №. С. 122-137.
22. **Beck G.** The Overton Window. – Mercury Radio Arts, 2010, 321 p.
23. **Линдгрэн М., Бандхольд Х.** Сценарное планирование. Связь между будущим и стратегией. – М.: Олимп-Бизнес. 2009. 256 с.
24. **Бондарик В.Н., Кучерявый А.Е.** Прогнозирование развития Интернета вещей на горизонте планирования до 2030 года // Труды МФТИ. Том 5. №3. 2013. С. 92-96.
25. <https://wikibon.com>.