УДК 519.873+519.876.2
DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.019

Метод ресурсосберегающего планирования распределенных вычислений в туманной вычислительной среде

А.Б. Клименко✉

Институт информационных наук и технологий безопасности РГГУ, Москва, Российская Федерация
anna_klimenko@mail.ru✉

Резюме. Вопросы организации распределенных вычислений в туманных вычислительных средах актуальны в настоящее время по причине циркулирующих по глобальным сетям возрастающих объемов данных. Исследования, проводимые в рамках разработки новых моделей, методов и технических средств концепции «туманных» вычислений, охватывают широкий круг тематик, включая разделение ресурсов, планирование вычислений, аутентификацию пользователей и безопасность хранения данных. Также представлены работы, посвященные вопросам расхода ресурсов, а именно, продлению сроков службы туманных устройств, которые оказывают существенное влияние на стоимость эксплуатации систем. В рамках данной статьи решение проблемы ресурсосбережения в указанном аспекте связано с обоснованным распределением вычислительной нагрузки по узлам туманного слоя, что влияет на такие показатели устройств, как вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка на отказ и средний остаточный ресурс вычислительного устройства. Предложен метод оценки целесообразности размещения на узлах вычислительной нагрузки в рамках «жадной» стратегии, а также метод выбора узлов для размещения нагрузки. Объединение этих методов составляет метод планирования распределенных вычислений в туманном слое сети с оптимизацией по критерию ресурсосбережения. Проведенный эксперимент демонстрирует целесообразность использования разработанного метода, а также позволяет выбрать область дальнейших исследований.

Ключевые слова: ресурсосбережение, планирование вычислений, туманные вычисления.

Для цитирования: Клименко А.В. Метод планирования распределенных вычислений в туманном слое сети с оптимизацией по критерию ресурсосбережения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2022;10(3). Доступно по: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1228 DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.019

A resource-saving method of distributed computation planning in fog-computing environment

A.B. Klimenko✉

Institute of IT and Security Technologies RSUH, Moscow, Russian Federation
anna_klimenko@mail.ru✉

Abstract. The issues of organizing distributed computation in fog-environments are currently relevant due to the increasing amount of data circulating over global networks. Research carried out in the field of the development of new models, methods and technical means of the fog computing concept covers a wide range of topics, including resource sharing, computational planning, user authentication, and data security. Papers on resource consumption are also presented, specifically those that explore the issue of extending the expedient service life of fog devices, which have a significant impact on the system operating cost. In this article, the solution to the problem of resource saving in this aspect is associated with a reasonable distribution of the computational load over the fog nodes which affects the device indicators, such as the probability of failure-free operation, gamma-percentage time between failures and the average residual resource of a computing device. A method for evaluating the feasibility of

© Клименко А.В., 2022

placing a computational load on nodes as part of a "greedy" strategy is proposed, as well as a method for selecting nodes to place the load. Combining these methods constitutes a method for distributed computing planning in the fog layer of a network with optimization according to the criterion of resource-saving. The conducted experiment demonstrates the applicability of the developed method and helps to choose the area for further research.

Keywords: resource-saving, computational planning, fog computing.

For citation: Klimenko A.B. A resource-saving method of distributed computations planning in the fog-computing environment. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3). Available from: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1228 DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.019 (In Russ.).

Введение

В настоящее время развитие получили информационные системы, реализованные на базе концепции «туманных» вычислений [1]. «Туманные» вычисления» (fog computing) при большом объеме входящего потока данных позволяют сократить нагрузку на сетевую инфраструктуру. Рассматривая пользовательскую операцию в контексте данной работы как отправку данных обработчику, обработку данных и отправку результата пользователю, а время выполнения пользовательской операции, соответственно, в рамках отправки пользователем входных данных в сеть и получения пользователем результата, очевидно также и позитивное влияние применения туманных вычислений на фактическое время выполнения пользовательской операции.

Несомненную актуальность применения концепции «туманных» вычислений подтверждает широкий круг разработанных на ее основе прикладных систем, например:

– медицинские сервисы [2,3];
– сервисы логистики [4];
– поддержка мобильных приложений [5];
– системы «умного» дома и «умного» города [6];
– системы дополненной реальности и др. [7].

Также в рамках исследования концепции «туманных» вычислений представлено большое количество работ, посвященных исследованию следующих аспектов данной парадигмы:

– разделение ресурсов [8];
– планирование вычислений [9, 10];
– перераспределение нагрузки и разгрузка устройств [11];
– вопросы ресурсосбережения [12].

Следует отметить, что вопросы ресурсосбережения в представленных в открытой печати работах сводятся к вопросам энергосбережения и стоимости эксплуатации с точки зрения затрачиваемой энергии, тогда как в проблеме ресурсосбережения присутствует еще один важный аспект, оставленный за рамками академических исследований, а именно, вопрос снижения расхода остаточного ресурса устройства.

Понятие остаточного ресурса устройства тесно связано с такими терминами, как вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка на отказ и средний остаточный ресурс. Перечисленные характеристики устройства позволяют оценить длительность его целесообразного использования до того, как потребуется замена. Продление срока эксплуатации устройства в свою очередь позволяет снизить стоимость эксплуатации сетевой инфраструктуры туманного слоя сети за счет снижения частоты замены вычислительных устройств.

Поскольку установлено влияние нагрузки устройства на вероятность безотказной работы, гамма-процентной наработки на отказ [13] и, следовательно, средний остаточный ресурс, можно вести речь о том, что проблема ресурсосбережения систем на

базе туманных вычислений может быть решена путем выбора способа распределения вычислительной нагрузки по устройствам туманного слоя.

Аналогичное исследование выполнено в работах [14, 15], однако описанная модель задачи распределения нагрузки применима для многопроцессорных систем, где вычислительные элементы объединены коммуникационной сетью таким образом, что временем пересылки данных можно пренебречь и, соответственно, рассчитаны на использование в системах, которым не характерна географическая распределенность. Для туманного слоя сети это свойство ярко выражено: время на транзит данных увеличивается с количеством транзитных участков сети между источником данных и их обработчиком. Поэтому новизну представленного метода ресурсосберегающего планирования распределенных вычислений в туманной вычислительной среде составляет учет параметра времени, отводящегося для передачи данных, а также трудоемкостей процедур приема и передачи данных, в том числе, транзитных, что и является отличием от аналога.

Материалы и методы

Общая схема функционирования систем на основе «туманных» вычислений следующая: в рамках кластера туманных устройств существует брокер туманного слоя (БТС). Им является относительно статичный узел, возможно, более производительный, чем туманные устройства окружения. БТС получает от пользовательских устройств данные и описание предназначенной к решению задачи, и именно на БТС возложена процедура принятия решения о том, что дальше происходит в данными: либо отправить их в облако для обработки, либо произвести планирование и распределение решения задачи по близлежащим туманным устройствам (которые, необходимо отметить, менее статичны, чем БТС и обладают значительно меньшей производительностью, чем БТС и облачный сервер) [16]. В условиях высокой динамики краевых устройств, очевидно, присутствует некоторая неопределенность в плане того, какие задачи БТС должен будет распределить. Поэтому следует полагать, что каждую приходящую задачу БТС должен распределить как можно быстрее и наилучшим на данном шаге образом – таким образом, будем придерживаться «жадной» стратегии, которая вряд ли приведет к оптимальному решению, но при этом полученное решение позволит уменьшить расход остаточных ресурсов используемых устройств туманного слоя, включая БТС. Также отметим, туманный слой сети динамичен: устройства могут быть либо отключены, либо владелец устройства может удалиться на такое расстояние от БТС, что использование устройства станет бессмысленным. Это ставит вопрос об информационном обеспечении БТС о состоянии ассоциированных с ним устройств, но на данном этапе будем полагать, что существует СУ, такая, что БТС осведомлен о состоянии узлов и наличии свободных вычислительных ресурсов на них.

Далее определим метод распределения нагрузки по критерию ресурсосбережения в виде следующей укрупненной схемы (Рисунок 1).

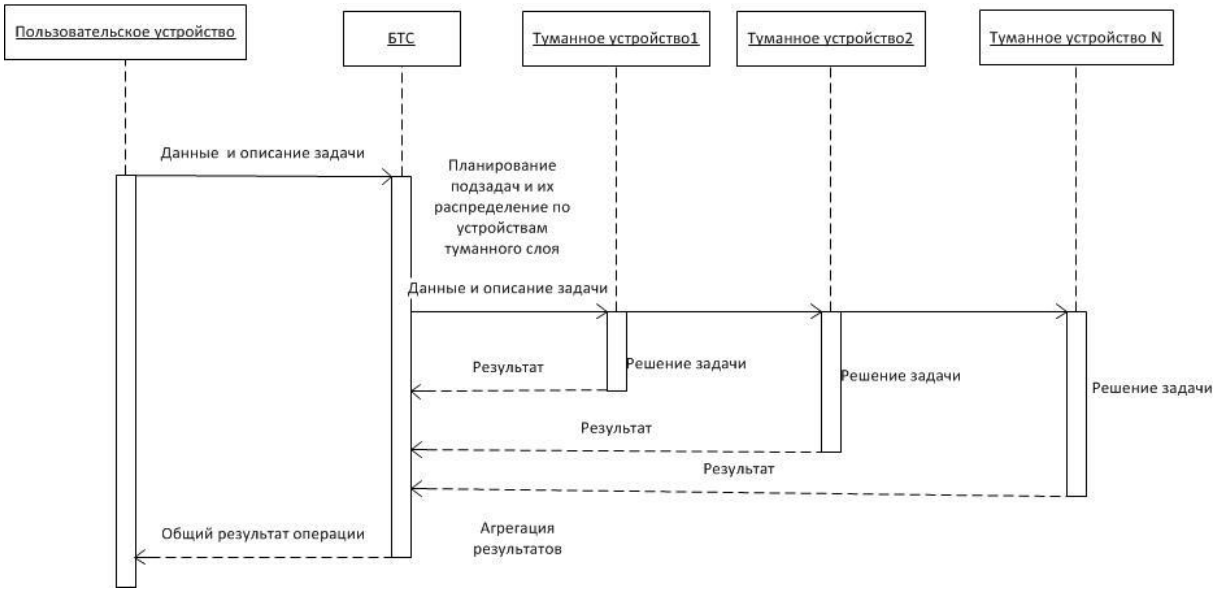

Рисунок 1 – Распределение нагрузки брокером туманного слоя
Figure 1 – Workload distribution by the fog broker

Допуская, что основная задача может быть разбита на подзадачи заранее определенным образом, цель разрабатываемого метода – пошаговое определение наилучшей привязки подзадачи к туманному устройству.

Модель оценивания эффективности распределения подзадач

В случае туманных вычислений устройство, включая БТС, может выполнять одну из двух ролей:

– выполнить обработку данных;

– передать ее дальше, в следующий узел, и так далее до достижения облачного сервера.

Третья альтернатива – когда устройство не делает ничего и не участвует в вычислительном процессе, но мы будем полагать, что такой исход невозможен по той причине, что с точки зрения расходования остаточного ресурса устройства для любого устройства наилучшим решением будет не участвовать в вычислениях. Поэтому будем считать, что если устройство обладает каким-либо свободным вычислительным ресурсом, и происходит распределение задачи, оно будет выполнять либо роль обработчика, либо роль промежуточного звена при передаче данных. В аспекте вычислительных ресурсов и обработка данных, и передача данных – задачи, обладающие определенной трудоемкостью. Сделаем допущение, что туманное устройство обладает вычислителем, который осуществляет все необходимые операции и по обработке данных, и по их переадресации далее, к следующему устройству.

Соответственно, основным этапом распределения подзадач становится оценивание перспективности того или иного распределения, а именно – определить, что является более выгодным для рассматриваемого туманного устройства: передавать данные в следующий узел (более удаленный от источника данных) или же обрабатывать их.

Для оценки ВБР устройства туманного слоя будем использовать выражение, предложенное в [14, 15]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot 2^{\frac{kD}{10}}, \quad (1)$$

где D – загрузка вычислителя (в долях).

Соответственно, может быть оценена ВБР(t), а также средний остаточный ресурс.

$$D = \frac{w_i}{p_j \cdot t_{constraint}}, \quad (2)$$

где w_i – трудоемкость выполняемой работы,

x – доля времени, отводимая на передачу данных для транзитного узла (поскольку передача данных не может занять все время, отпущенное на выполнение пользовательской операции).

Будем рассматривать ситуацию, как показано на Рисунке 2, когда туманный узел № 1 выполняет только передачу данных в облако:

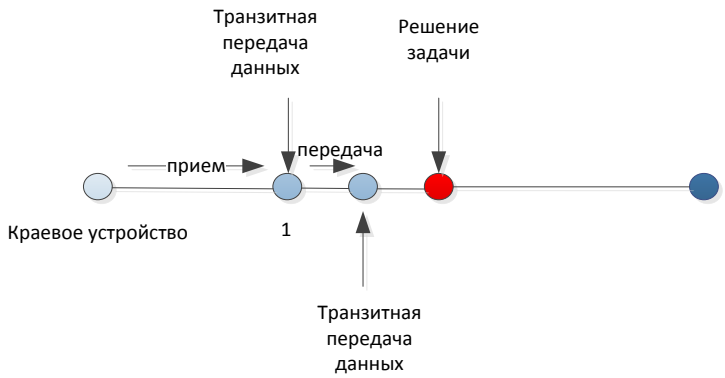

Рисунок 2 – Передача данных устройствами туманного слоя
Figure 2 – Data transmission process by the fog-devices

Тогда его ВБР и средний остаточный ресурс будут равны соответственно:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{kD/10}} = e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{kw/10pt_{constraint}}}. \quad (3)$$

Трудоемкость трансфера данных зависит, соответственно, от объема пересылаемых данных:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k\xi(d)/10pt_{constraint}}}. \quad (4)$$

Соответственно, средний остаточный ресурс будет принимать значения:

$$R = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0 \cdot 2^{k\xi(d)/10pt_{constraint}}}. \quad (5)$$

Далее, рассмотрим ситуацию, когда узел № 1 принимает данные объемом d, осуществляет их обработку, а затем отправляет результаты обратно на устройство пользователя.

Получим следующее выражение значений ВБР (t):

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k(w_{receive}+w_{process}+w_{send})/10pt_{constraint}}}. \quad (6)$$

И, соответственно, средний остаточный ресурс:

$$R = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0 \cdot 2^{k(w_{receive}+w_{process}+w_{send})/10pt_{constraint}}}. \quad (7)$$

Учитывая, что при трансфере данных узел пересылает тот же объем, что и получает в случае обработки, приведем выражения к следующему виду:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k \cdot 2w_{receive}/10pt_{constraint}}}; \quad (8)$$

$$R = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0 \cdot 2^{k \cdot 2w_{receive}/10pt_{constraint}}}. \quad (9)$$

Получим аналитическую оценку соотношений параметров $x, w_{receive}, w_{send}, w_{process}$.

Для этого решим неравенство:

$e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k(w_{receive}+w_{process}+w_{send})/10pt_{constraint}}} - \lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k \cdot 2w_{receive}/10pt_{constraint}}$, где левая часть – оценка ВБР узла, осуществляющего обработку данных, правая часть – оценка ВБР узла, осуществляющего транзит данных, при фиксированном значении t.

$$e^{-\lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k(w_{receive}+w_{process}+w_{send})/10pt_{constraint}}} - \lambda_0 \cdot t \cdot 2^{k \cdot 2w_{receive}/10pt_{constraint}}; \quad (10)$$

$$-2^{\frac{k(w_{receive}+w_{process}+w_{send})}{10pt_{constraint}}} \frac{2kw_{receive}}{10pt_{constraint}}; \quad (11)$$

$$2^{\frac{2kw_{receive}}{10pt_{constraint}}} \frac{k(w_{receive}+w_{process}+w_{send})}{10pt_{constraint}}. \quad (12)$$

Данное выражение возведем в степень $10\frac{pt_{constraint}}{k}$, получим:

$$2^{\frac{2w_{receive}}{x}} > 2^{w_{receive}+w_{send}+w_{process}}. \quad (13)$$

Перейдем к сравнению показателей степени.

$$w_{receive} + w_{process} + w_{send} < 2w_{receive}/x. \quad (14)$$

Иными словами, перенос обработки данных на туманный узел целесообразен только в том случае, если суммарная трудоемкость задач получения данных, обработки и отправки результата не будет превышать удвоенное значение отношения трудоемкости получения данных к доле времени от пользовательской операции, выделяемой для этого.

Получив метод оценивания целесообразности размещения на устройстве нагрузки, связанной с обработкой данных, перейдем к изложению метода планирования вычислений.

Метод ресурсосберегающего планирования распределенных вычислений в туманной вычислительной среде

Состояние устройства S будем описывать следующим кортежем:

$$S_i =< p_i, W_i, edge_dist, \{< br_dist, br_id >\}, \{< v\,min_j, br_id >\}, \tau >, \quad (15)$$

где p_i – производительность устройства,

W_i – трудоемкость задач, которые устройство уже решает (в том числе, трудоемкость задач передачи информации как транзитное устройство),

$edge_dist$ – расстояние в транзитных участках сети от края сети,

$\{< br_dist, br_id >\}$ – расстояния от узла до брокеров владельца туманных устройств,

$\{< v\,min, b\,r_id >\}$ – минимальная пропускная способность сети на пути от узла до брокеров,

τ – время эксплуатации устройства.

Также задан объем данных, необходимых для обработки *V_data*, объем программного кода *V_code*, трудоемкость задачи обработки данных W_{task} и время t_{const}, за которое задача должна быть решена.

Тогда брокер туманного слоя должен произвести следующие шаги:

1. В качестве первого варианта решения выбирается сам узел-брокер. Для него производится оценка трудоемкости уже решаемых задач, при которой целесообразно решать поступившую, в соответствии с выражением (14).

2. Брокер осуществляет просмотр локального списка состояний узлов S, выбирая ближайшие к нему, расположенные не более чем на расстоянии одного транзитного участка сети, и составляет список S_i. Здесь мы делаем допущение, что если ни один узел не подойдет, то он автоматически становится транзитным.

3. Для каждого S_i выполняется проверка: $x < 1$ с учетом добавляемого времени на транзитную передачу данных.

3.1. Проверить выполнение неравенства (14):

3.2. Поместить S_i в список узлов-кандидатов.

3.3. Из сформированного списка выбрать тот узел, для которого значение *x* будет минимальным (это означает, что время, приходящееся на транзит данных, и прием-передачу, будет минимальным и, следовательно, основная нагрузка будет иметь «полезный» характер).

4. Если ни одного узла S_i не обнаружено, брокер выбирает из локального списка состояний узлы, расположенные на расстоянии 2 транзитных участков сети.

5. Если ни один из узлов S_i не удовлетворяет условию (14), то тогда из списка узлов на расстоянии одного транзитного участка сети, включая сам брокер, выбирается узел с максимальной производительностью, для которого будет выполняться $x<1$.

Результаты

Проведем оценку целесообразности размещения обработки данных на узлах, пользуясь выражением (14), делая допущение, что скорость передачи данных прямо пропорционально производительности узла.

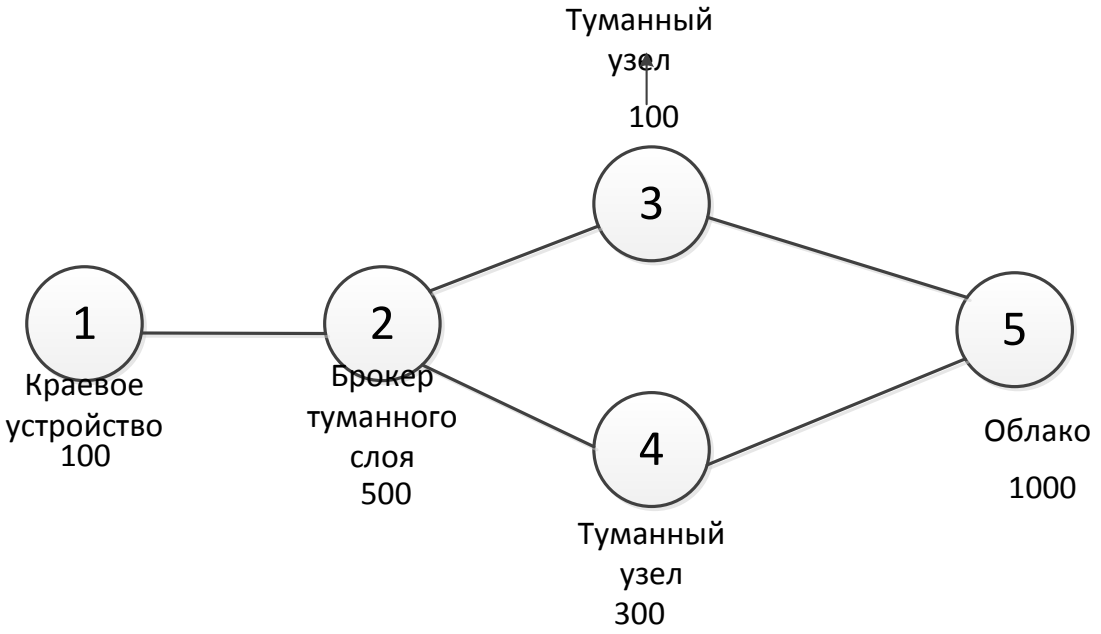

Рисунок 3 – Экспериментальная топология фрагмента сети
Figure 3 – Experimental subnetwork topology

Рассмотрим следующие значения параметров, приведенные в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры эксперимента
Table 1 – Experiment parameters

	$W_{receive}$	W_{send}	$W_{process}$	T_{decl}
1	1000	100	500	50
2	500	100	500	50
3	100	100	500	50

Для экспериментов 1–3 левая и правая части неравенства (14) для узлов 1–4 будет иметь вид, как показано на Рисунках 4–6.

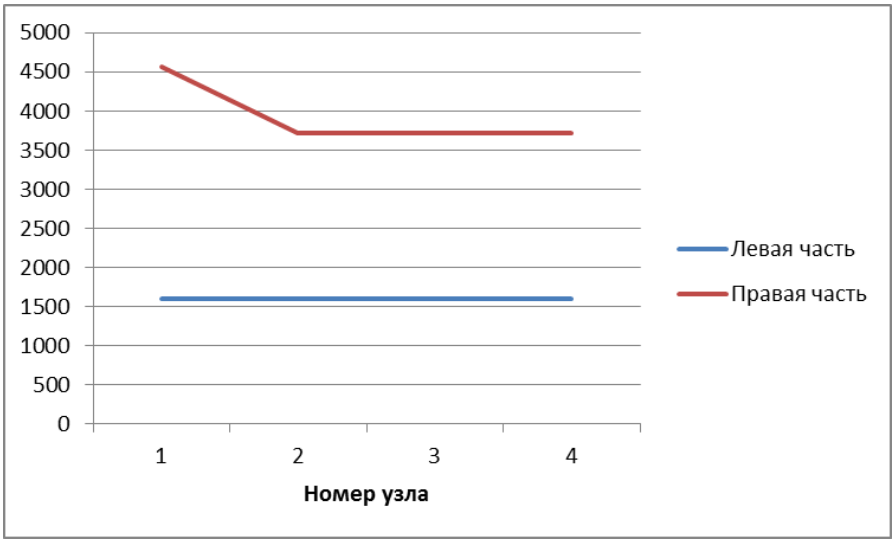

Рисунок 4 – Значения левой и правой частей неравенства (14) для эксперимента № 1
Figure 4 –Values of the left and right parts of the inequation (14) for the experiment No. 1

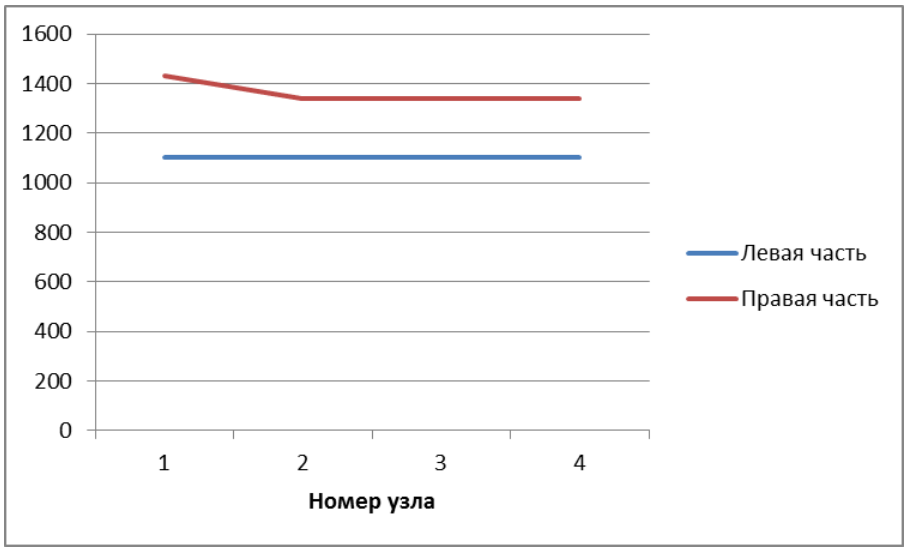

Рисунок 5 – Значения левой и правой частей неравенства (14) для эксперимента № 2
Figure 5 – Values of the left and right parts of the inequation (14) for the experiment No. 2

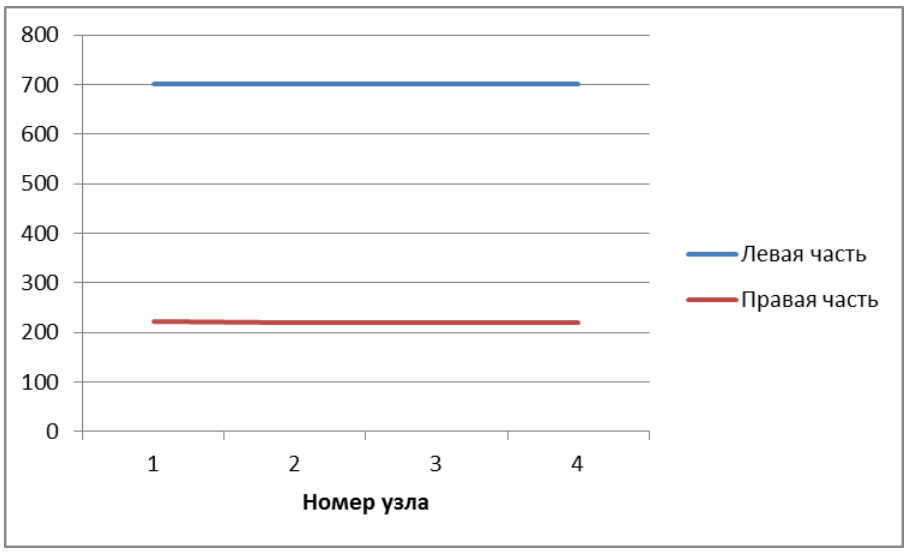

Рисунок 6 – Значения левой и правой частей неравенства (14) для эксперимента № 3
Figure 6 – The values of the left and right parts of the inequation (14) for the experiment No. 3

Из графиков Рисунков 4–6 видно, что с уменьшением объема исходных данных для обработки в соответствии с разработанным методом оценки целесообразности размещения, размещение обработки данных становится нецелесообразным.

Проведем моделирование значений вероятности безотказной работы на временном интервале 100–1000 часов для узлов 1–4 при исходных $\lambda_0 = 0{,}001$ (ч$^{-1}$) и для производительностей и трудоемкостей задач, представленных в Таблице 1 и на Рисунке 3 (см. Рисунок 7).

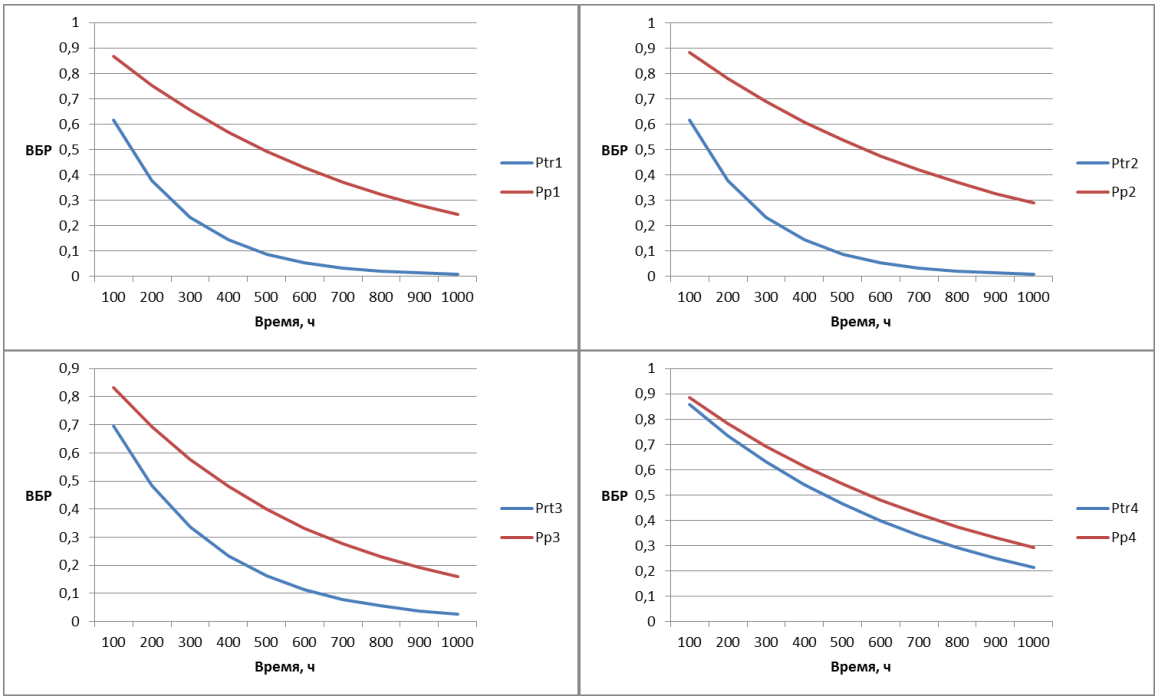

Рисунок 7 – Значения ВБР для узлов 1–4 для эксперимента № 1
Figure 7 – The reliability function value for nodes 1–4 in the experiment No. 1

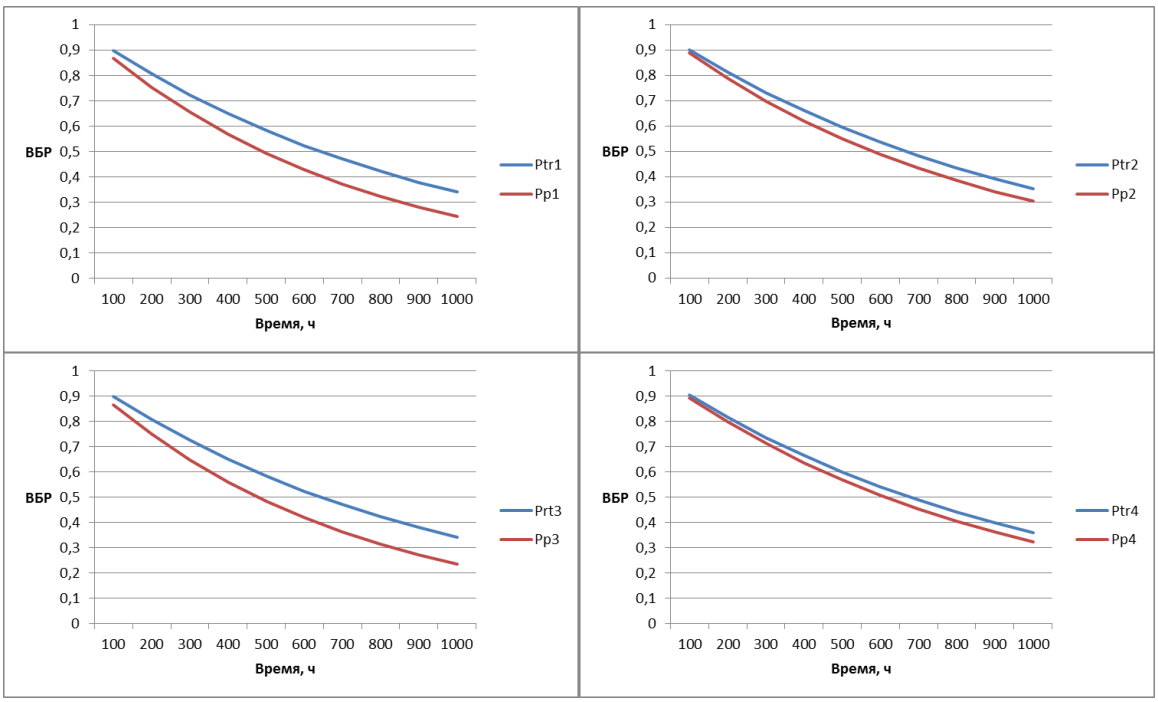

Рисунок 8 – Значения ВБР для узлов 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) для эксперимента № 3
Figure 8 – The reliability function value for nodes 1–4 in the experiment No. 3

Обсуждение

Результаты проведенных экспериментов полностью подтверждают целесообразность использования разработанного метода для размещения вычислительных задач на устройствах туманного слоя. Видно, что при большом объеме входящих данных, применение концепции туманных вычислений полностью оправдано и с точки зрения сохранения остаточного ресурса вычислительных устройств, однако более детальный подход и применение предлагаемого метода размещения нагрузки позволяют получить дополнительный выигрыш: для эксперимента 1 использование узла № 1 в качестве обработчика данных более предпочтительно, чем узла № 4 – по той причине, что на выполнение полезной нагрузки узла № 1 может быть выделен больший интервал времени, в результате чего нагрузка может быть распределена таким образом, что загруженность вычислительного элемента снизится.

Также видно, что для результатов эксперимента № 3 – с малым объемом входящих данных – характерна выгода пересылки задач и данных на обработку в облако. Однако из графика к эксперименту № 3, для узла № 4 также видно, что различие между значениями ВБР узла в условиях пересылки данных и обработки мало, что может быть использовано следующим образом: узлы с такими характеристиками могут быть выбраны для обработки данных. Исходные данные для эксперимента таковы, что минимальную разницу между ВБР узлов для различных режимов работы демонстрируют узлы с высокой производительностью. То же характерно и для результатов эксперимента № 1: для узла № 4, обладающего более высокой производительностью, различие в значениях ВБР для двух режимов функционирования относительно невелико, что в дальнейшем ставит задачу получения аналитических оценок соотношений производительности узлов и трудоемкостей передачи данных и их обработки.

Заключение

В настоящее время все большее количество информационных систем строится на основе концепции туманных вычислений. Анализ представленных в открытой печати работ показал, что, невзирая на достаточно глубокую проработку темы, не затронута проблема ресурсосбережения с точки зрения сохранения остаточных ресурсов устройств туманного слоя, в то время как продление срока службы вычислительных устройств оказывает положительный эффект на стоимость эксплуатации информационных систем.

В рамках данной работы была предложены модель и метод оценивания эффективности распределения вычислительных задач в туманной среде, а также метод ресурсосберегающего планирования распределенных вычислений в туманной вычислительной среде, отличающиеся от аналогов учетом особенности туманного слоя сети, а именно, географической его распределенности.

Результаты проведенных экспериментов подтверждают целесообразность использования предлагаемого метода, а также позволяют выбрать направление дальнейших исследований в части оценивания соотношений производительности узла и трудоемкостей в различных режимах его функционирования, что позволит выделить такие узлы туманного слоя, наличие которых послужило бы послаблением ограничений на распределение задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jatla D. Fog Computing. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*. 2022;06.
2. Mutlag, A., Ghani M., Arunkumar N., Mohammed M., Mohd O. Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems. *Future Generation Computer Systems*. 2018;90:62–78.
3. Hassanalieragh M., Page A., Soyata T., Sharma G., Aktas M., Mateos G., Kantarci B., Andreescu S. Health Monitoring and Management Using Internet-of-Things (IoT) Sensing with Cloud-Based Processing: Opportunities and Challenges. *IEEE International Conference on Services Computing proc.* 2015.
4. Kanth R., Heikkonen J. Sensors and Fog Computing Paradigm in Innovative Health and Food Supply Chain Applications. *Food Manufacturing Efficiency*. 2020;4:1–8.
5. Li K. Scheduling Precedence Constrained Tasks for Mobile Applications in Fog Computing. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2022:1–14.
6. Chen C., Wang Z., Guo B. The Road to the Chinese Smart City: Progress, Challenges, and Future Directions. *IT Professional*. 2016;18:14–17.
7. Salman S., Sitompul T., Papadopoulos A., Nolte T. Fog Computing for Augmented Reality: Trends, Challenges and Opportunities. *IEEE International Conference on Fog Computing (ICFC) proc*. 2020:56–63.
8. Jiang Y., Tsang D. Delay-Aware Task Offloading in Shared Fog Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018;5:4945–4956.
9. Al-Safi A., Ameen H., Ibrahim Z., Gheni H. Cost-effective resource and task scheduling in fog nodes. *IJEECS*. 2022.
10. Malik A. A Review of Resource Scheduling in Fog based Cloud Environment. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019;7:1073–1077.
11. Kaneva K., Aboutorab N., Sorour S., Reed M. On Offloading Fog Radio Access Networks Fronthaul Using Device Caching and Cooperation. *GLOBECOM 2017. IEEE Global Communications Conference*. 2017:1–6.

12. Gao S., Peng Z., Xiao B., Xiao Q., Song. YSCoP: Smartphone energy saving by merging push services in Fog computing. *IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*. 2017:1–10.
13. Klimenko A., Melnik E. Information and Control Systems with Distributed Ledger Usage: A Reliability Issue. In: Silhavy, R. (eds) Artificial Intelligence in Intelligent Systems. CSOC 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;229:133–144.
14. Мельник Э.В., Горелова Г.В. Эффект выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных распределенных информационно-управляющих системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;11:29–35.
15. Мельник Э.В. Применение концепции «туманных» вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем. *Известия тульского государственного университета. Технические науки*. 2020;2:273–283.
16. Xu J. Hao, Z. Zhang R. and Sun, X. A Method Based on the Combination of Laxity and Ant Colony System for Cloud-Fog Task Scheduling. *IEEE Access*. 2019;7:116218-116226. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936116.

REFERENCES

1. Jatla D. Fog Computing. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*. 2022;06.
2. Mutlag, A., Ghani M., Arunkumar N., Mohammed M., Mohd O. Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems. *Future Generation Computer Systems*. 2018;90:62–78.
3. Hassanalieragh M., Page A., Soyata T., Sharma G., Aktas M., Mateos G., Kantarci B., Andreescu S. Health Monitoring and Management Using Internet-of-Things (IoT) Sensing with Cloud-Based Processing: Opportunities and Challenges. *IEEE International Conference on Services Computing proc.* 2015.
4. Kanth R., Heikkonen J. Sensors and Fog Computing Paradigm in Innovative Health and Food Supply Chain Applications. *Food Manufacturing Efficiency*. 2020;4:1–8.
5. Li K. Scheduling Precedence Constrained Tasks for Mobile Applications in Fog Computing. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2022:1–14.
6. Chen C., Wang Z., Guo B. The Road to the Chinese Smart City: Progress, Challenges, and Future Directions. *IT Professional*. 2016;18:14–17.
7. Salman S., Sitompul T., Papadopoulos A., Nolte T. Fog Computing for Augmented Reality: Trends, Challenges and Opportunities. *IEEE International Conference on Fog Computing (ICFC) proc*. 2020:56–63.
8. Jiang Y., Tsang D. Delay-Aware Task Offloading in Shared Fog Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018;5:4945–4956.
9. Al-Safi A., Ameen H., Ibrahim Z., Gheni H. Cost-effective resource and task scheduling in fog nodes. *IJEECS*. 2022.
10. Malik A. A Review of Resource Scheduling in Fog based Cloud Environment. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019;7:1073–1077.
11. Kaneva K., Aboutorab N., Sorour S., Reed M. On Offloading Fog Radio Access Networks Fronthaul Using Device Caching and Cooperation. *GLOBECOM 2017. IEEE Global Communications Conference*. 2017:1–6.

12. Gao S., Peng Z., Xiao B., Xiao Q., Song. YSCoP: Smartphone energy saving by merging push services in Fog computing. *IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*. 2017:1–10.
13. Klimenko A., Melnik E. Information and Control Systems with Distributed Ledger Usage: A Reliability Issue. In: Silhavy, R. (eds) Artificial Intelligence in Intelligent Systems. CSOC 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;229:133–144.
14. Melnik E.V., Gorelova G.V. Effekt vyravnivaniya vychislitel'noj nagruzki processornyh ustrojstv v vysokonadezhnyh raspredelennyh informacionno-upravlyayushchih sistemah. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. 2012;11:29–35. (In Russ.).
15. Mel'nik E.V. Primenenie koncepcii "tumannyh" vychislenij pri proektirovanii vysokonadezhnyh informacionno-upravlyayushchih sistem .izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. *Tekhnicheskie nauki*. 2020;2;273–283. (In Russ.).
16. Xu J. Hao, Z. Zhang R. and Sun, X. A Method Based on the Combination of Laxity and Ant Colony System for Cloud-Fog Task Scheduling. *IEEE Access*. 2019;7:116218-116226. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936116.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Клименко Анна Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной математики института Информационных наук и технологий безопасности РГГУ, Москва, Российская Федерация.
e-mail: anna_klimenko@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6527-8108

Anna Borisovna Klimenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Fundamental and Applied Mathematics Department, IT and Security Technologies Institute of RSUH, Moscow, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 27.09.2022; принята к публикации 30.09.2022.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 27.09.2022; accepted for publication 30.09.2022.