

Э.В. Мельник, И.Б. Сафроненкова, А.Ю. Таранов**ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ
В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА С МОБИЛЬНЫМИ
КОМПОНЕНТАМИ НА БАЗЕ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА***

Рассмотрены проблемы, связанные с организацией вычислительного процесса в системах мониторинга с мобильными компонентами на базе распределенного реестра (РР), в том числе задача перераспределения вычислительной нагрузки. Требования к функционированию современных распределенных систем мониторинга включают согласованную работу узлов всей системы, принадлежащих различным слоям вычислительной среды, в т.ч. туманному и краевому слоям, которые отличаются высокой динамичностью. Совместное использование технологий РР и мобильных компонентов в составе распределенных систем мониторинга позволяет расширить круг задач, решаемых такими системами, в т.ч., по причине того, что снимает вопросы, связанные с синхронизацией географически распределённых копий данных. Однако при такой организации распределенной системы необходимо учитывать следующие особенности вычислительной среды: латентность, связанную с синхронизацией данных на узлах РР, изменение географического положения мобильных компонентов, ограниченность бортового энергоресурса и высокую динамичность туманного и краевого слоев. Проведенные ранее исследования показали, что в условиях высоко динамичных вычислительных сред эффективно применение метода сокращения поискового пространства на основе онтологического анализа. Для корректной работы данного метода необходимо разработать онтологическую модель, отражающую особенности рассматриваемой вычислительно-коммуникационной среды, включающей РР и мобильные компоненты. В статье представлена новая онтологическая модель функционирования распределенной системы мониторинга, учитывающая наличие мобильных компонентов и узлов РР. Разработаны продукционные правила размещения вычислительной нагрузки в туманных и краевых слоях и на их основе реализована программная модель, позволившая провести ряд вычислительных экспериментов. Результаты экспериментальных исследований продемонстрировали эффективность предложенного подхода и адекватность разработанной онтологической модели.

Распределенная система мониторинга; распределенный реестр; мобильный компонент; туманные вычисления; краевые вычисления; онтологическая модель; распределение вычислительной нагрузки.

E.V. Melnik, I.B. Safronenkova, A.Yu. Taranov**ONTOLOGICAL APPROACH TO SOLVING THE WORKLOAD
RELOCATION PROBLEM IN A DISTRIBUTED MONITORING SYSTEM
WITH MOBILE COMPONENTS BASED ON A DISTRIBUTED LEDGER**

The paper considers the problems associated with the organization of the computing process in monitoring systems with mobile components based on a distributed ledger (DL), including the task of redistributing the computing load. The requirements for the functioning of modern distributed monitoring systems include the coordinated operation of nodes of the entire system belonging to various layers of the computing environment, including foggy and edge layers, which are highly dynamic. The joint use of DL technologies and mobile components as part of distributed monitoring systems makes it possible to expand the range of tasks solved by such systems, including due to the fact that it removes issues related to the synchronization of geographically distributed copies of data. However, with such an organization of a distributed system, it is necessary to take into

* Исследование выполнено в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН 122020100270-3.

account the following features of the computing environment: latency associated with data synchronization at DL nodes, changes in the geographical location of mobile components, limited onboard energy resources and high dynamism of the fog and edge layers. Previous studies have shown that in highly dynamic computing environments, the use of the search space reduction method based on ontological analysis is effective. For the correct operation of this method, it is necessary to develop an ontological model reflecting the features of the considered computing and communication environment, including DL and mobile components. In this paper a new ontological model of the functioning of a distributed monitoring system has been developed, taking into account the presence of mobile components and DL nodes. Production rules for placing computational load in foggy and edge layers have been developed and a software model has been implemented based on them, which allowed a number of computational experiments to be carried out. The results of experimental studies have demonstrated the effectiveness of the proposed approach and the adequacy of the developed ontological model.

Distributed monitoring system; distributed ledger; mobile component; fog computing; edge computing; ontological model; workload relocation.

Введение. Концепции краевых и туманных вычислений подразумевает возможность смещения части вычислительной нагрузки ближе к месту генерации данных [1, 2]. Такое перераспределение позволяет более эффективно организовывать вычислительный процесс в географически распределенных системах [3, 4]. Распределенные системы мониторинга с мобильными компонентами, реализованные на базе концепции краевых и туманных вычислений, позволяют осуществлять сбор данных с географически распределенных территорий, чем значительно расширяют сферу своего применения. Однако актуализируется ряд вопросов, связанных с синхронизацией данных, осуществлением процедуры обращения к этим данным, а также ограниченностью энергоресурса мобильных компонентов. Внедрение в такие системы технологий распределенного реестра позволяет решить отмеченные проблемы, а именно: сократить время передачи данных и нагрузку на коммуникационную инфраструктуру за счет возможности работать с «ближайшей» копией РР. С другой стороны, процедура синхронизации данных на узлах РР вносит дополнительные временные издержки. Таким образом, комплексные временные издержки включают следующие компоненты:

- ♦ временные издержки, связанные с многократным решением задачи перераспределения вычислительной нагрузки в условиях динамичной среды и множества мобильных компонентов с ограниченным энергоресурсом;

- ♦ временные издержки, возникающие при синхронизации данных на узлах РР.

Поскольку временные издержки негативно сказываются на эффективности функционирования систем рассматриваемого класса, то необходимо принять меры, позволяющие их сократить.

В рамках данного исследования будем рассматривать методы сокращения временных издержек, связанных с решением задачи перераспределения вычислительной нагрузки в описанных условиях.

В настоящее время существуют различные подходы, методы и алгоритмы решения задачи назначения и перераспределения вычислительной нагрузки в туманной среде [5]. Возможность их эффективного использования применительно к данной предметной области будет рассмотрена в следующем разделе.

1. Анализ существующих методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки. При организации вычислительного процесса одной из задач является задача назначения и перераспределения вычислительной нагрузки на вычислительные устройства. Анализ открытых источников показал, что в настоящее время существует достаточное количество методов/ подходов/ алгоритмов к ее решению [5]. Однако при решении данной задачи необходимо учитывать следующие особенности рассматриваемой предметной области, влияющие на выбор методов ее решения:

- ◆ большое число узлов-кандидатов для переноса вычислительной нагрузки;
- ◆ динамичность среды функционирования [6];
- ◆ ограниченный энергоресурс мобильных компонентов, входящих в состав системы;
- ◆ латентность синхронизации данных на узлах РР.

Перечисленные факторы накладывают существенные ограничения на известные методы (подходы, алгоритмы) решения задачи переназначения вычислительной нагрузки. Анализ применимости данных методов в имеющихся условиях приведен в табл. 1.

Таблица 1

Анализ применимости подходов, методов и алгоритмов для решения задачи перераспределения вычислительной нагрузки

Подход/Метод/ Алгоритм	Недостатки
Двухуровневый метод планирования ресурсов в туманных вычислениях [7]	Не ориентирован на сложные топологии
Механизм переноса вычислительной нагрузки для уменьшения задержек при выполнении задач в соответствии с характеристиками контейнеров [8]	Не учитывает влияния времени решения задачи переноса вычислительной нагрузки на эффективность решения пользовательской задачи
Алгоритм формирования расписания, основанный на эвристиках [9]	Высокая вычислительная сложность в случае большой размерности вычислительной среды
Четырехуровневая архитектура планирования с учетом задержек [10]	Не учитывает временные издержки, связанные с передачей данных
Алгоритм разгрузки для выполнения задач на свободных узлах [11]	Применим только в гомогенной среде
Подход к управлению ресурсами, основанный на динамическом планировании многопользовательских устройств с использованием методов классификации облачных серверов и разнородных устройств [12]	Применяется для задач малой размерности, ориентирован на взаимодействие с облачными ресурсами
Метод на основе локальных групп устройств (ЛГУ) [13]	Время получения решения может быть неприемлемо долгим за счет множественных информационных обменов
Модифицированный метод решения задач перераспределения рабочей нагрузки для систем мониторинга и прогнозирования на основе онтологии [14].	Не учитывает наличие мобильных компонентов и узлов распределенного реестра
Метод синтеза устройств реализации искусственных нейронных сетей, ориентированных на туманные вычисления. [15]	Ориентирован на ограниченное и заранее известное число устройств. Ориентирован на задачи, которые «удобно» разделить на подзадачи с заданными характеристиками (многослойные нейронные сети)

Из табл. 1 видно, что наиболее «подходящим» методом решения задачи назначения и перераспределения вычислительной нагрузки в имеющихся условиях является метод онтологического анализа, в основе которого лежит возможность усечения поискового пространства. Схема, отражающая суть данного метода, изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схема метода онтологического анализа

Данный метод эффективно применялся с целью сокращения времени принятия решения в системах различного назначения, функционирующих в туманной среде. Так, в проекте РФФИ 20-04-60485, использование онтологического подхода позволило сократить время реконфигурации в автоматизированных системах раннего предупреждения социальных возмущений от 1,87 до 2,5 раз (в зависимости от конфигурации системы) в сравнении с аналогом.

Эксперименты, проведенные в ходе выполнения НИР «Методы и средства построения высоконадежных реконфигурируемых систем мониторинга и диагностики на базе технологий «цифровой экономики»», продемонстрировали сокращение временных издержек, возникающих в процессе организации вычислений в системах мониторинга и диагностики, реализованных на базе концепции туманных вычислений до 2,5 раз в сравнении с аналогом.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование онтологического подхода с целью сокращения поискового пространства эффективно, о чем свидетельствуют проведенные ранее вычислительные эксперименты. Однако стоит отметить, что в использованных ранее для реализации данного метода онтологических моделях не были учтены особенности функционирования мобильных компонентов (в части энергопотребления) а также узлов РР (в части латентности синхронизации данных). Для эффективной реализации метода онтологического анализа применительно к рассматриваемой области, необходимо разработать новую онтологическую модель, которая лежит в основе метода.

2. Разработка онтологической модели распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами на базе РР. Анализ предметной области. Для описания рассматриваемой предметной области необходимо провести ее всесторонний анализ, определив основные концепты, их свойства и связи между ними. Это потребует для последующего создания онтологической модели функционирования распределенной системы, которая является ядром онтологического подхода. Для этого подробно рассмотрим концепцию организации вычислительного процесса в туманной и краевом слоях в распределенной системе мониторинга с мобильными компонентами на базе РР (рис. 2).

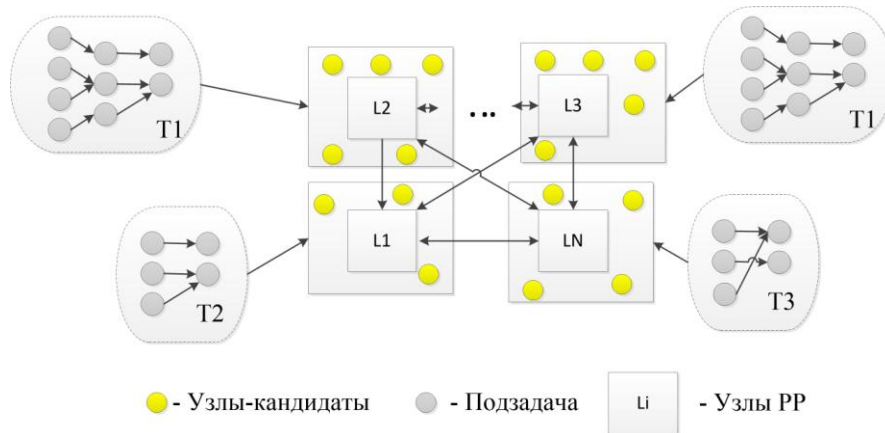


Рис. 2. Концепция организации вычислительного процесса в распределенной системе мониторинга с мобильными компонентами на базе РР

Распределенная система мониторинга функционирует в туманном слое и включает в себя следующие элементы:

- ◆ мобильные компоненты (БПЛА) – узлы краевого слоя;
- ◆ узлы РР;
- ◆ узлы туманного слоя (личные ПК, мобильные телефоны);
- ◆ узлы облачного слоя (ЦОД).

В процессе функционирования распределённая система мониторинга решает разнообразные задачи (T_i):

- ◆ сбор данных (преимущественно с использованием мобильных компонентов);
- ◆ передача данных;
- ◆ анализ данных (ресурсы мобильных компонентов – краевые устройства, узлы туманного слоя, узлы РР, облачные ресурсы);
- ◆ хранение данных;
- ◆ прогноз/ принятие решения (с использованием журнала записи данных, который реализуется за счет узлов РР).

Сформулируем основные проблемы, возникающие в процессе функционирования распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами на базе РР:

- 1) ограниченный энергоресурс мобильных компонентов;
- 2) латентность при синхронизации данных в узлах РР.

Решение отмеченных проблем тесно связано с решением задачи назначения и перераспределения вычислительной нагрузки [16]. Ограниченность бортового ресурса приводит к необходимости организовывать вычислительный процесс таким образом, чтоб, имеющийся на борту энергоресурс, позволил выполнить назначенную на данное мобильное устройство функциональную задачу. Это возможно достичь за счет эффективного перераспределения задач на вычислительные узлы, которое позволяет высвободить ресурсы, необходимые для решения функциональных задач. Но, с другой стороны, занимает время, необходимое для решения задачи перераспределения вычислительной нагрузки, которая в имеющихся условиях является NP-сложной. Латентность, возникающая при реализации процедуры достижения консенсуса на узлах РР [17, 18], вносит дополнительные временные издержки, которые негативно сказываются на общем функционировании системы.

Таким образом, для решения задачи перераспределения вычислительной нагрузки необходимо использовать методы, позволяющие компенсировать временные издержки, вызванные перечисленными выше особенностями функционирования распределенных систем.

Разработка онтологической модели предметной области. На основании проведенного анализа предметной области, отражающей особенности функционирования распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами на базе РР в части организации вычислительного процесса, получена следующая иерархия класс-подкласс выделенных концептов (рис. 3) [19, 20].

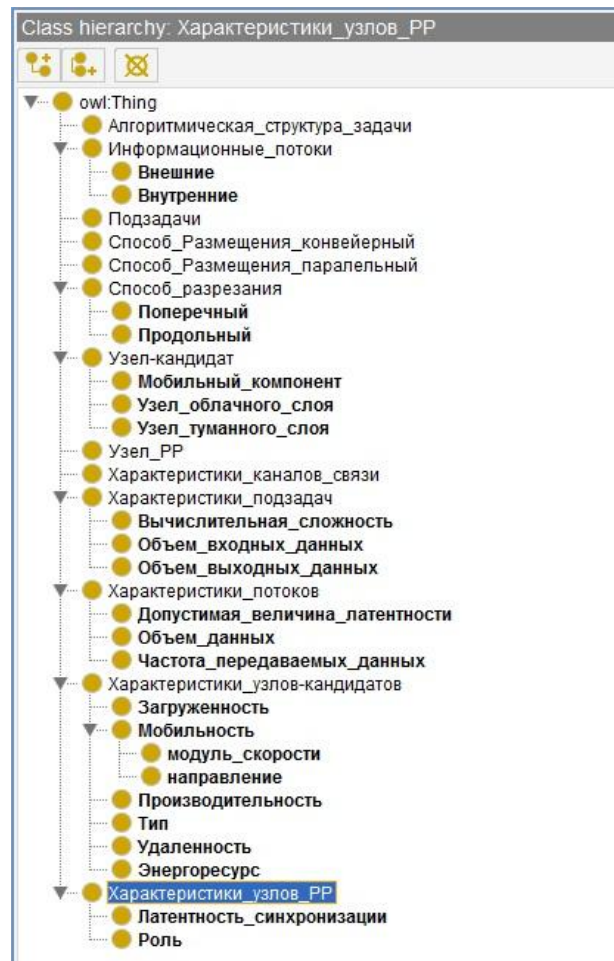


Рис. 3. Иерархическая структура концептов предметной области

На рис. 4 показано графовое отображение разработанной онтологической модели в неразвернутом виде, т.е. отображены основные концепты без «вложений». На рис. 5 показан общий вид онтологической модели.

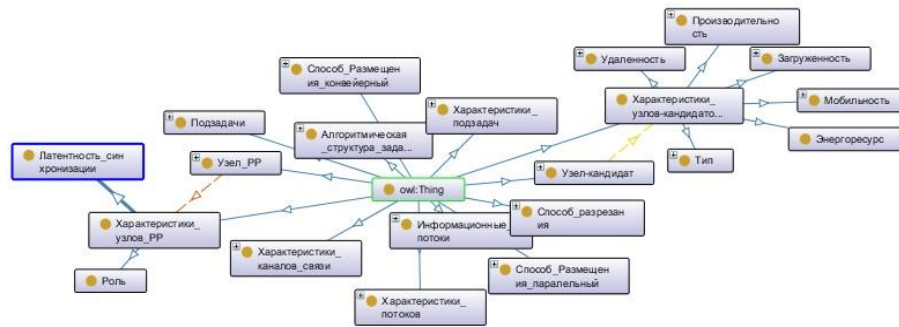


Рис. 4. Графовое представление разработанной онтологической модели



Рис. 5. Полное графовое представление онтологической модели

Разработанная онтологическая модель отражает особенности функционирования распределенной системы мониторинга в туманном и краевых слоях и учитывает наличие в своем составе мобильных компонентов и узлов РР.

В соответствии с методом, описанным в [14], для «отсеивания» ресурсов, не отвечающих требованиям подзадач для их размещения, к классам онтологической модели необходимо применить продукционные правила, отражающие общие принципы организации распределенных вычислений. На основе данных правил была разработана программная модель [21] и проведены эксперименты, позволяющие оценить эффективность применяемого метода.

3. Вычислительный эксперимент. Эффективность применения метода сокращения поискового пространства на основе онтологического анализа при решении задачи перераспределения вычислительной нагрузки с учетом наличия мобильных компонентов и узлов РР будем оценивать формуле (1):

$$\Delta = \frac{F_{нач} - F_{кон}}{F_{нач}} \times 100\%, \quad (1)$$

где Δ – изменение количества узлов-кандидатов до и после применения метода на основе онтологий, %;

$F_{нач}$ – количество узлов до применения метода на основе онтологий;

$F_{кон}$ – количество узлов после применения метода на основе онтологий.

Эксперимент 1. Начальное количество узлов-кандидатов для размещения вычислительной нагрузки ($F_{нач}$) – 50, глубина туманного слоя – {1;10} хоп, глубина туманного слоя – {1;30} хоп (рис. 6).

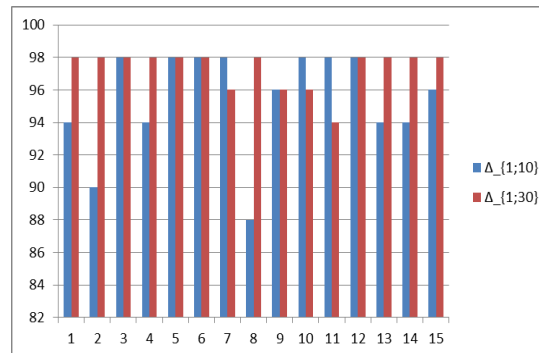


Рис. 6. Эффективность онтологического метода для $F_{нач} = 50$ для различной глубины туманного слоя

Эксперимент 2. Начальное количество узлов-кандидатов для размещения вычислительной нагрузки ($F_{нач}$) – 100, глубина туманного слоя – {1;10} хоп, глубина туманного слоя – {1;30} хоп (рис. 7).

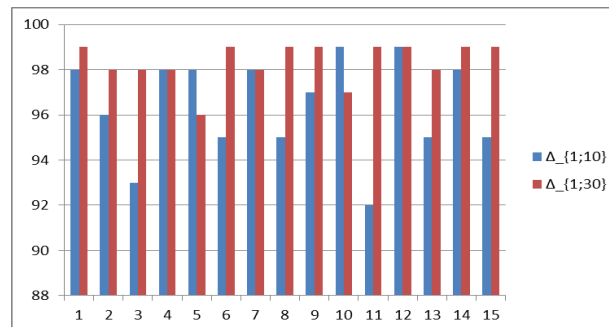


Рис. 7. Эффективность онтологического метода для $F_{нач} = 100$ для различной глубины туманного слоя

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что применение онтологического метода при решении задачи перераспределения вычислительной нагрузки позволяет сократить поисковое пространство в среднем на 93%. Это позволяет сократить время принятия решения при решении задачи перераспределения вычислительной нагрузки.

Заключение. В работе была рассмотрена проблема организации вычислительного процесса в распределённой системе мониторинга с мобильными компонентами на базе РР в части сокращения времени принятия решения. Был проведен анализ существующих методов (подходов, алгоритмов) к решению задачи перераспределения вычислительной нагрузки в туманной среде, на основе которого был сделан вывод о перспективности использования онтологического подхода. Однако имеющиеся разработанные онтологические модели и продукционные правила, применяемые к их классам, не учитывали наличие мобильных компонентов и узлов РР. В связи с этим, была разработана новая онтологическая модель, учитывающая особенности распределенной системы и среды ее функционирования. Также была разработана программная модель, позволяющая провести вычислительный эксперимент и подтверждающая эффективность применяемого метода для сокращения поискового пространства. Полученные результаты подтвердили адекватность разработанной онтологической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kaur K., Sachdeva M.* Fog Computing in IOT: An Overview of New Opportunities // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 605. – P. 113-119.
2. Cisco global cloud index: forecast and methodology (2014–2019). White paper.
3. *Клименко А.Б.* Метод ресурсосберегающего планирования распределенных вычислений в туманной вычислительной среде // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10 (3), № 3 (38). – С. 27-28.
4. *Naha R.K. et al.* Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 47980-48009.
5. *Matrouk, K., Alatoun, K.* Scheduling Algorithms in Fog Computing: A Survey // International Journal of Networked and Distributed Computing. – 2021. – Vol. 9. – P. 59-74.
6. *Yi S., Qin Z., Li Q.* Security and Privacy Issues of Fog Computing: A Survey // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9204. – P. 685-695.
7. *Sun Y., Lin F., Xu, H.* Multi-objective Optimization of Resource Scheduling in Fog Computing Using an Improved NSGA-II // Wireless Personal Communications. – 2018. – Vol. 102. – P. 1369-1385.
8. *Yin L., Luo J., Luo H.* Tasks scheduling and resource allocation in fog computing based on containers for smart manufacturing // IEEE Trans. Ind. Inform. – 2018. – Vol. 14, No. 10. – P. 4712-4721.
9. *Wang J., Li D.* Task scheduling based on a hybrid heuristic algorithm for smart production line with fog computing // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 5. – P. 1023.
10. *Wu C.-g., Li W., Wang L., Zomaya A.Y.* Hybrid Evolutionary Scheduling for Energy-Efficient Fog-Enhanced Internet of Things // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 641-653.
11. *Li G., Yan J., Chen L., Wu J., Lin Q., Zhang Y.* Energy Consumption Optimization With a Delay Threshold in Cloud-Fog Cooperation Computing // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 159688-159697.
12. *Ghenai A., Kabouche Y., Dahmani W.* Multi-user dynamic scheduling-based resource management for Internet of Things applications // 2018 International Conference on Internet of Things, Embedded Systems and Communications (IINTEC). – 2018. – P. 126-131.
13. *Мельник Э.В., Клименко А.Б., Иванов Д.Я.* Модель задачи формирования сообществ устройств информационно-управляющих систем в средах туманных вычислений // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Тр. – Тула: Тульский государственный университет. – 2018. – Вып. 2. – С. 1-6.
14. *Melnik E.V., Safronenkova I.B., Klimenko A.B.* A Modified Ontology-Based Method of Workload Relocation Problem Solving for Monitoring and Forecasting Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 229. – P. 145-152.
15. *Бахтин В.В., Тюрин С.Ф., Подлесных И.А.* Метод синтеза устройств нейросетевого распознавания на программируемой логике для реализации режима fog computing // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника. Информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 41. – С. 168-188.
16. *Brucker P.* Scheduling Algorithms. – Springer Berlin, Heidelberg, 2007. – 371 p.
17. *Fu X., Wang H., Shi P.* A survey of Blockchain consensus algorithms: mechanism, design and applications // Sci. China Inf. Sci. – 2021. – Vol. 64. – P. 121101.
18. *Niya S.R., Beckmann R., Stiller B.* DLIT: A Scalable Distributed Ledger for IoT Data // 2020 Second International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA). – 2020. – P. 100-107.
19. *Водяхо А.И., Никифоров В.В.* Онтологические модели для систем реального времени // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 2 (28). – С. 240-252.
20. *Ной Наталья Ф., Макгинесс Дебора Л.* Разработка онтологий 01: руководство по созданию вашей первой онтологии. – Режим доступа: http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka_ontologiy_01_ruk.pdf (дата обращения: 03.10.2023).
21. Свид. о гос. регистрации прогр. для ЭВМ 2023665640 Российская Федерация. Модуль онтологического анализа для распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами / Э.В. Мельник, И.Б. Сафроненкова, Таранов А.Ю. Заявл. 07.07.2023; зарегистрир. 18.07.2023; опублик. 18.07.2023.

REFERENCES

1. Kaur K., Sachdeva M. Fog Computing in IOT: An Overview of New Opportunities, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, Vol. 605, pp. 113-119.
2. Cisco global cloud index: forecast and methodology (2014–2019). White paper.
3. Klimenko A.B. Metod resursoberegayushchego planirovaniya raspredelennykh vychisleniy v tumannoy vychislitel'noy srede [A resource-saving method of distributed computation planning in fog-computing environment], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2022, Vol. 10 (3), No. 3 (38), pp. 27-28.
4. Naha R.K. et al. Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 47980-48009.
5. Matrouk, K., Alatoun, K. Scheduling Algorithms in Fog Computing: A Survey, *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 2021, Vol. 9, pp. 59-74.
6. Yi S., Qin Z., Li Q. Security and Privacy Issues of Fog Computing: A Survey, *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, Vol. 9204, pp. 685-695.
7. Sun Y., Lin F., Xu, H. Multi-objective Optimization of Resource Scheduling in Fog Computing Using an Improved NSGA-II, *Wireless Personal Communications*, 2018, Vol. 102, pp. 1369-1385.
8. Yin L., Luo J., Luo H. Tasks scheduling and resource allocation in fog computing based on containers for smart manufacturing, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 2018, Vol. 14, No. 10, pp. 4712-4721.
9. Wang J., Li D. Task scheduling based on a hybrid heuristic algorithm for smart production line with fog computing, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 5, pp. 1023.
10. Wu C.-g., Li W., Wang L., Zomaya A.Y. Hybrid Evolutionary Scheduling for Energy-Efficient Fog-Enhanced Internet of Things // *IEEE Transactions on Cloud Computing*. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – P. 641-653.
11. Li G., Yan J., Chen L., Wu J., Lin Q., Zhang Y. Energy Consumption Optimization with a Delay Threshold in Cloud-Fog Cooperation Computing, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 159688-159697.
12. Ghenai A., Kabouche Y., Dahmani W. Multi-user dynamic scheduling-based resource management for Internet of Things applications, *2018 International Conference on Internet of Things, Embedded Systems and Communications (IINTEC)*, 2018, pp. 126-131.
13. Mel'nik E.V., Klimenko A.B., Ivanov D.Ya. Model' zadachi formirovaniya soobshchestv ustroystv informatsionno-upravlyayushchikh sistem v sredakh tumannykh vychisleniy [Model of the problem of forming communities of information control systems devices in fog computing environments], *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019: Tr.* [All-Russian meeting on management problems of VSPU-2019: Proceedings]. Tula: Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2018, Issue 2, pp. 1-6.
14. Melnik E.V., Safronenkova I.B., Klimenko A.B. A Modified Ontology-Based Method of Workload Relocation Problem Solving for Monitoring and Forecasting Systems, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, Vol. 229, pp. 145-152.
15. Bakhtin V.V., Tyurin S.F., Podlesnykh I.A. Metod sinteza ustroystv neyrosetevogo raspoznavaniya na programmiruemoy logike dlya realizatsii rezhima fog computing [Method of synthesis of neural network recognition devices based on programmable logic for the implementation of fog computing mode], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika. Informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems], 2022, No. 41, pp. 168-188.
16. Brucker P. Scheduling Algorithms. Springer Berlin, Heidelberg, 2007, 371 p.
17. Fu X., Wang H., Shi P. A survey of Blockchain consensus algorithms: mechanism, design and applications, *Sci. China Inf. Sci.*, 2021, Vol. 64, pp. 121101.
18. Niya S.R., Beckmann R., Stiller B. DLIT: A Scalable Distributed Ledger for IoT Data, *2020 Second International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA)*, 2020, pp. 100-107.
19. Vodyakho A.I., Nikiforov V.V. Ontologicheskie modeli dlya sistem real'nogo vremeni [Ontology models for real time systems], *Ontologiya proektirovaniya* [Design Ontology], 2018, Vol. 8, No. 2 (28), pp. 240-252.

20. *Noy Natal'ya F., Makginess Debora L. Razrabotka ontologiy 01: rukovodstvo po sozdaniyu vashey pervoy ontologii* [Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology]. Available at: http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka_ontologiy_101_ruk.pdf (accessed 03 October 2023).
21. *Mel'nik E.V., Safronenkova I.B., Taranov A.Yu. Svid. o gos. registratsii progr. dlya EVM 2023665640 Rossiyskaya Federatsiya. Modul' ontologicheskogo analiza dlya raspredelennoy sistemy monitoringa s mobil'nymi komponentami* [Certificate of state registration of a computer program 2023665640 Russian Federation. Ontological analysis module for a distributed monitoring system with mobile components]. Declared. 07.07.2023; registered. 18.07.2023; published. 18.07.2023.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Мельник Эдуард Всеволодович – Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: evm17@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634615459; г.н.с.

Сафроненкова Ирина Борисовна – e-mail: safronenkova050788@yandex.ru; тел.: +79604678753; м.н.с. лаб. ИТиПУ.

Таранов Антон Юрьевич – e-mail: mailfortexas@gmail.com; тел.: 88634615459; инженер лаб. ИТиПУ.

Melnik Eduard Vsevolodovich – Federal Research Center, The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: evm17@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634615459; chief researcher.

Safronenkova Irina Borisovna – e-mail: safronenkova050788@yandex.ru; phone: +79604678753; junior research fellow.

Taranov Anton Yurevich – e-mail: mailfortexas@gmail.com; phone: +78634615459; engineer.