

УДК 004.75

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.31.4.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.013)

Подходы к постановке задачи оптимизации распределения ресурсов в вычислительной сети

Т.С. Рожкова, В.В. Афанасьев, И.И. Ветров

*Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации
Орёл, Россия*

Резюме: В статье рассматривается распределенная вычислительная система, представленная множеством мобильных терминалов, обеспечивающая возможность обслуживать запросы пользователей этих терминалов для выполнения программ, потребность в вычислительных ресурсах, которых превышает имеющиеся на этих терминалах локальные вычислительные ресурсы. Эта возможность обеспечивается путем реализации парадигмы кооперативных вычислений, поддерживающей процедуру динамического формирования кооперативного вычислительного ресурса множества мобильных терминалов, с учетом возможности их отключения и подключения к процедуре кооперативных вычислений. С использованием теоретико-множественного представления определяются такие параметры функционирования системы, как время отклика узла на запрос предоставления вычислительных ресурсов, а также период задержки в очереди для запросов, принадлежащих различным мобильным терминалам. На основе этих параметров, для указанных условий, в обобщенном виде ставится оптимизационная задача кооперативного использования вычислительных ресурсов. Детально рассматривается постановка частных задач оптимизации вычислительных ресурсов для системы, состоящей из двух мобильных терминалов, учитывающих различные условия их потребности в вычислительных ресурсах, а также текущего наличия вычислительных ресурсов в узлах системы. Подходы, полученные в результате постановки указанных частных задач, распространяются на систему, состоящую из множества мобильных терминалов.

Ключевые слова: распределенная вычислительная система, туманные вычисления, кооперативные вычисления, распределение ресурсов, распараллеливание вычислительных задач, вычислительный ресурс, время отклика узла, кооперативная вычислительная сеть.

Для цитирования: Рожкова Т.С., Афанасьев В.В., Ветров И.И. Повышение эффективности применения мер защиты от использования дубликатов RFID-меток во внешней торговле. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=859> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.013

Approaches to statement of the resource distribution optimization problem in a computer network

T.S. Rozhkova, V.V. Afanasyev, I.I. Vetrov

*The Federal Guard Service Academy
Oryol, Russia*

Abstract: The article discusses a distributed computing system, represented by a variety of mobile terminals, providing the ability to serve the requests of users of these terminals to run programs, the need for computing resources, which exceeds the local computing resources available on these terminals. This possibility is provided by the implementation of the cooperative computing paradigm, which supports the procedure for dynamic formation of the cooperative computing resource of a plurality of mobile terminals, taking into account the possibility of their disconnection and connection to the cooperative computing procedure. Using the set-theoretic representation, such parameters of the system functioning are determined as the response time of the node to the request for the provision of computing resources, as well as the delay period in the queue for requests belonging to different mobile terminals. On the basis of these parameters, for the specified conditions, an optimization problem of the cooperative use of computing resources is posed in a generalized form. The formulation of particular

problems of optimization of computing resources for a system consisting of two mobile terminals is considered in detail, taking into account various conditions of their need for computing resources, as well as the current availability of computing resources in the nodes of the system. The approaches obtained as a result of the formulation of these particular problems are extended to a system consisting of many mobile terminals.

Keywords: distributed computing system, fog computing, cooperative computing, resource allocation, parallelization of computing tasks, computing resource, node response time, cooperative computing network.

Для цитирования: Rozhkova T.S., Afanasyev V.V., Vetrov I.I. Increasing the effectiveness of the application of protection measures against the use of duplicate RFID-tags in foreign trade. . *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=859> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.013 (In Russ).

Введение (Introduction)

В наши дни применение мобильных вычислительных устройств становится все более повсеместным. Ожидается, что пятое поколение беспроводных сетей и выше будет поддерживать миллиарды подключенных устройств, известных как Интернет вещей (IoT), с использованием совершенно новых технологий, таких как миллиметровые волны, небольшие ячейки, многоантенность, полнодуплексность и кооперативная связь [1-4]. Такие устройства стимулируют разработку многих новых приложений, превращая данные и информацию в действия, которые создают новые возможности. Но при возрастании количества подобных задач увеличивается задержка передачи данных в сети, а также расход энергии при их передаче на большие расстояния. На сегодняшний день широко применяется перенаправление сложных и ресурсоемких задач в удаленные облачные сервисы. Но, в последнее время, облачных вычислений становится недостаточно для удовлетворения всех ключевых показателей эффективности. Хотя облачные вычисления обеспечивают удобный доступ к централизованному пулу настраиваемых и мощных вычислительных ресурсов, они часто не могут удовлетворить строгие требования приложений, чувствительных к задержкам, из-за зачастую непредсказуемой задержки в сети и высокой пропускной способности. Растущий объем распределенных данных также делает нецелесообразным или чрезмерно ресурсоемким перенос всех данных по уже перегруженным магистральным сетям в удаленное облако.

Для удовлетворения требований к задержке и надежности, предъявляемых широким спектром приложений, необходима эффективная обработка данных, генерируемых на границе сети. Поскольку поступления задач для вычислений могут быть высоко динамичными и неоднородными, одному вычислительному устройству трудно постоянно предоставлять удовлетворительные вычислительные услуги. В связи с этим, предлагается использование незадействованных вычислительных ресурсов мобильных устройств, находящихся в непосредственной близости, без передачи выполнения задач в удаленное облако. Однако, возможности мобильных устройств ограничены вычислительными ресурсами и энергоемкостью аккумулятора [5, 6]. В связи с этим, предлагается совместное использование вычислительных ресурсов нескольких мобильных устройств для решения одной задачи, таким образом балансируя количество решаемых задач между географически распределенными вычислительными узлами.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Рассматриваются распределенные сети, в которых несколько вычислительных узлов, представленных в виде мобильных устройств, могут помогать друг другу решать

поступающие задачи при недостатке собственных вычислительных ресурсов [7]. Каждый узел сети вместо того, чтобы отправлять необработанные задачи в облачный центр обработки данных, пересылает их на соседние узлы, обладающие недостающими вычислительными ресурсами, такими как объем оперативной памяти или утилизация процессорного времени. При этом улучшается качество обслуживания пользователей на границе сети, измеряемое, в данном случае, средним временем отклика вычислительного узла, на которое может влиять задержка в очереди и время передачи задач в обоих направлениях между узлами сети.

Таким образом, пользователи сети могут снизить затраты и повысить качество обслуживания посредством эффективного механизма распределения ресурсов. Поэтому механизм распределения вычислительных ресурсов имеет решающее значение для вычислений. Однако выделение вычислительных ресурсов для получения максимальной полезности является сложной задачей оптимизации.

Объектом исследования является распределенная вычислительная сеть, представляющая собой множество разнородных по составу мобильных устройств, разнесенных в пространстве, обладающих возможностью динамического выхода из системы или перемещения в ней, а также с децентрализованным подходом к доступности ресурсов и взаимодействию между собой, так как каждый узел играет как роль клиента, так и роль сервера, предназначенная для распределения вычислительных ресурсов (Рисунок 1) [8].

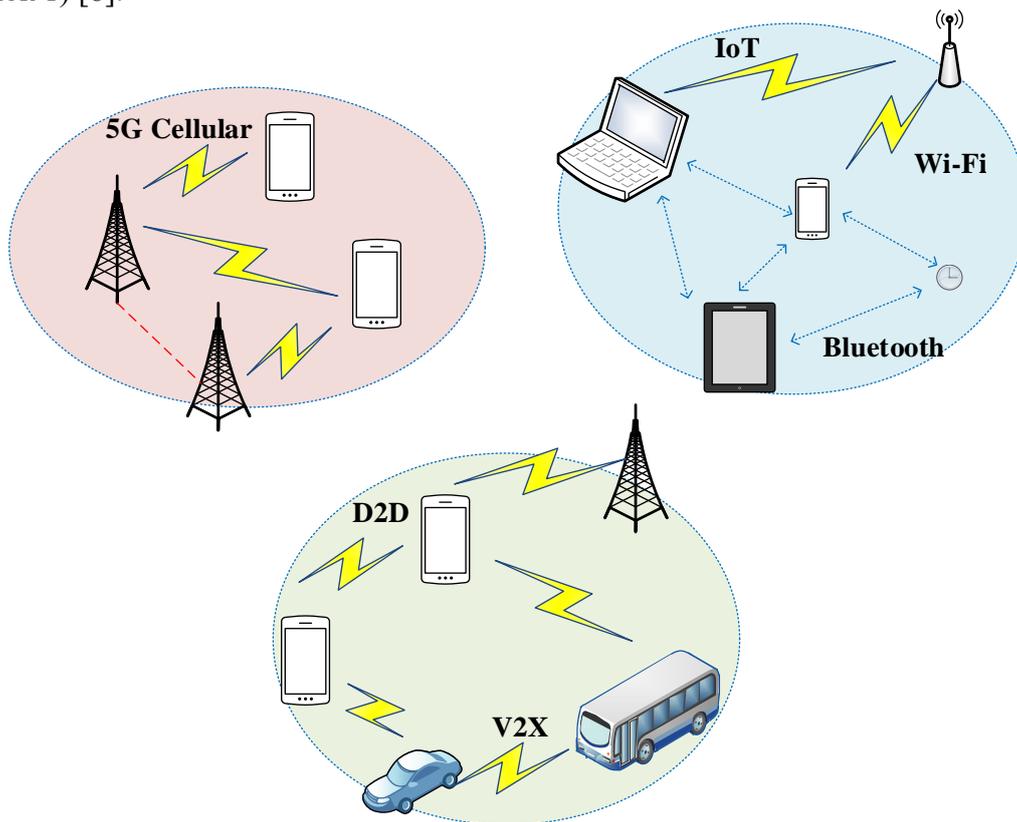


Рисунок 1 - Распределенная вычислительная система
Figure 1 - Distributed computing system

Работа ведется в области задач о назначениях – одной из фундаментальных задач комбинаторной оптимизации в области математической оптимизации. Любой исполнитель может быть назначен на выполнение любой работы или ее части.

Необходимо распределить работы так, чтобы выполнить их с минимальными затратами. В качестве работ выступают поступающие задачи, а в качестве исполнителей – вычислительные узлы. В нашем случае необходимо, чтобы для каждой работы могло быть задействовано более одного исполнителя. Таким образом, применяется задача о назначении целей, которая позволяет сформулировать задачу оптимального назначения в случае, когда требуется кооперация агентов.

Учитывая мобильность узлов и их способность выходить из сети в случайный момент времени, вычислительные узлы работают в крайне стохастической среде со случайными поступлениями задач как во временной, так и в пространственной областях.

Ресурсом в данном случае является процессорное время одного или нескольких вычислительных устройств и объем их оперативной памяти, которые нужно распределять между задачами в реальном времени. Данные ресурсы считаем пополняемыми, и не будем учитывать их энергетическую составляющую. Использование такого типа ресурсов предполагает нестационарную задачу распределения ресурсов. Необходимость решения задачи в режиме реального времени сильно усложняет как саму задачу, так и ее формализацию: как правило, функция прибыли заранее неизвестна и распределение процессорного времени и памяти зависит от поступающих задач и обычно производится на основе приоритетов задач.

Постановка задачи оптимизации (Optimization problem statement)

В рассматриваемой сети существует набор разнородных вычислительных узлов, каждый из которых имеет свой набор доступных возможностей и услуг. Одному вычислительному узлу дается задача для выполнения, или от своего пользователя, или от соседнего узла, который заинтересован в использовании ресурсов, предоставляемых другими узлами сети, для более эффективного выполнения задачи. Первой задачей является разложение поступившей задачи на более мелкие подзадачи, которые могут быть переназначены другим узлам в сети и выполняться параллельно [9].

Однако часто существует множество возможных формулировок проблемы для данной задачи, и выбор лучшего способа декомпозиции задачи может зависеть от структуры организации вычислительного узла и количества различных типов услуг, предоставляемых этим узлом. Основной задачей при этом является обеспечение минимального суммарного времени отклика вычислительных узлов при совместной обработке поступившей задачи.

Обозначим вычислительную сеть, состоящую из множества узлов N как $S = \{1, 2, \dots, N\}$. Предполагаем, что каждый узел уже связан с одним или несколькими узлами данной сети. На каждый вычислительный узел поступают задачи. Обозначим задачи, поступающие на узел j , как z_j , $0 \leq z_j \leq 1$. При этом $z_j = 1$, если узел j обрабатывает весь поток задач самостоятельно, и $z_j = 0$ – если узел j не обрабатывает поступающий поток задач, а перенаправляет все задачи на соседние узлы.

Время отклика узла j при обработке всех задач самостоятельно определяется следующим образом:

$$T_j(z_j) = \frac{1}{\mu_j - \lambda_j} \quad (1)$$

где λ_j - интенсивность поступления задач на вычислительный узел j (среднее число задач, приходящееся на единицу времени);

μ_j - максимальная интенсивность поступления задач, которая может быть обработана вычислительными ресурсами, установленными в j -м вычислительном узле в каждый момент времени.

Рассмотрим случай, когда сеть состоит из двух вычислительных узлов и собственных вычислительных ресурсов узла j недостаточно для выполнения поступающих задач. В данном случае узел j перераспределяет часть $(1-d_j)z_j$ поступающих задач на соседний узел i с достаточным количеством вычислительных ресурсов при $0 \leq d_j < 1$, $i \neq j$, $j \in S$, d_j - задачи, отправленные узлом j на выполнение узлу i .

Так как узлы тумана не могут взаимодействовать друг с другом, каждый узел должен принимать независимое решение о количестве задач, которые он будет обрабатывать самостоятельно.

В таком случае, задача оптимизации для вычислительной сети, состоящей из двух узлов, когда производительность одного вычислительного узла может быть улучшена за счет перераспределения части задач на другой вычислительный узел, может быть представлена следующим образом:

$$\min_{0 \leq z_j \leq 1} T_j(z_j) \text{ при } \eta_j(z_j) \leq \bar{\eta}_j \quad (2)$$

где $T_j(z_j)$ - время отклика узла j , когда он обрабатывает часть z_j принятых задач;

$\bar{\eta}_j$ - максимальный КПД, поддерживаемый аппаратными средствами узла j тумана.

Рассмотрим случай, когда вычислительный узел j отправляет все свои задачи на вычислительный узел i , то есть $z_j = 0$ и $0 \leq d_j < 1$. В таком случае, время отклика узла j определяется следующим образом:

$$T_j^{C1}(z_j = 0, d_j) = \xi_j \left[d_j \left(\frac{1}{\mu_j - d_j \lambda_j} \right) + (1-d_j) \left(\tau_{ij} + \frac{1}{\mu_i - \lambda_i - (1-d_j) \lambda_j} \right) \right] \quad (3)$$

где τ_{ij} - время прохождения сигнала между j и i вычислительными узлами;

$\xi_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_i + \lambda_j}$ - взвешенный коэффициент, пропорциональный скорости поступления задач в период задержки очереди для каждого узла j . Обеспечивает одинаковую задержку в очереди для задач, связанных с разными вычислительными узлами сети.

Следующий случай возникает, если вычислительных ресурсов, которые предоставляются узлом i тумана, недостаточно для обработки всей рабочей нагрузки, полученной от узла j . В этом случае узел j пересылает часть $(1-d_j)z_j \lambda_j$ задач на узел i . Тогда время отклика узла определяется как:

$$T_j^{C2}(d_j, z_j) = \xi_j \left[z_j \beta_j \left(\frac{1}{\mu_j - z_j d_j \lambda_j} \right) + z_j (1-d_j) \left(\tau_{ij} + \frac{1}{\mu_i - \lambda_i - (1-d_j) z_j \lambda_j} \right) \right] \quad (4)$$

Подставляя уравнения (3) и (4) в задачу (2) для оптимизации значений z_j и d_j , узел j тумана может дополнительно улучшить время отклика своих узлов.

Далее можно расширить полученные результаты в общую кооперативную вычислительную сеть с более чем двумя узлами [10]. В этой сети каждый узел может пересылать свои задачи на другие узлы и одновременно помогать другим узлам обрабатывать их задачи. В отличие от модели вычисления с двумя узлами, время отклика в кооперативной сети также зависит от стратегии сотрудничества между узлами [11].

Задача оптимизации при кооперативных вычислениях может быть представлена в следующем виде:

$$\min_{z=\{z_1, z_2, \dots, z_N\}} \sum_{j \in S} T_j^C(\xi_j, z_j) \text{ при } \eta_j(z_j) \leq \bar{\eta}_j, 0 \leq (z_j) \leq 1, \forall j \in S \quad (5)$$

где $T_j^C(\xi_j, z_j)$ - среднее время отклика всех пользователей, связанных с узлом j , когда узлу j могут помочь другие узлы вычислительной сети;

$$\xi_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{k \in S} \lambda_k} \text{ - весовой коэффициент для каждого узла } j.$$

В данном случае каждый узел j может разделить свои задачи на $N+1$ разделов, включая один раздел ϕ_{jj} , который обрабатывается самостоятельно, а часть задач ϕ_{jk} - пересылается вычислительному узлу $k \in C_j$, который также может перераспределить их на любые другие узлы. Тогда время отклика узла j , определяется как:

$$T_j^{C3}(\xi_j, \phi_{j\bullet}) = \frac{1}{\sum_{i \in S} \lambda_i} \left[\phi_{jj} \left(\frac{1}{\mu_j - \phi_{jj}} \right) + \sum_{i \in C_j} \phi_{ji} \left(\tau_{ji} + \frac{1}{\mu_i - \sum_{k \in S} \phi_{ki}} \right) \right] \quad (6)$$

где $\phi_{j\bullet} = \langle \phi_{ji} \rangle_{i \in S \setminus \{j\}}$ - вектор запроса узла j ;

$\phi_{\bullet i} = \langle \phi_{ji} \rangle_{j \in S \setminus \{i\}}$ - сервисный вектор узла i ;

$\phi = \langle \phi_{ji} \rangle_{i, j \in S}$ - матрица обработки задач для всей вычислительной сети;

$\phi_{ic} = 1 - \sum_{j \in S \setminus \{i\}} \phi_{ij}$, $\phi_{ki} = \lambda_k \phi_{kj}$ - величина потока задач, обрабатываемого узлом j для узла k ;

$\phi_{k\bullet} = \langle \phi_{kj} \rangle_{j \in S \setminus \{k\}}$ - вектор потока задач, переданного узлом k другим узлам тумана.

Задачу оптимизации (5) с учетом (6) можно переписать следующим образом:

$$\max_{\phi_{\bullet}, \dots, \phi_{N\bullet}} \sum_{j=1}^N T_j^{C3}(\xi_j, \phi_{j\bullet}) \quad (7)$$

при $\sum_{k \in C_j} \phi_{jk} + \phi_{jj} + \phi_{jc} = \lambda_j$

$$\sum_{k \in S} \phi_{kj} \leq \min \{ \mu_j, \chi_j \}, 0 \leq \phi_{kj} \leq \lambda_k, \forall k, j \in S.$$

Задача оптимизации (7) является негладкой [12] и поэтому не может быть решена с использованием традиционных подходов оптимизации, которые могут обрабатывать только гладкую целевую функцию.

Заключение (Conclusion)

Достигнута цель работы по постановке задачи оптимизации процесса распределения ресурсов, учитывающая их ограниченность и мобильность устройств в сети. Поставлена задача по минимизации среднего времени отклика вычислительных узлов с учетом разных скоростей поступления задач. Исследованы варианты оптимизации процесса распределения вычислительных ресурсов для двухузловой вычислительной сети, а так же для кооперативной сети, включающей более двух узлов. Дальнейшим направлением исследования является новая распределенная структура оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu L., Chen R., Geirhofer S., Sayana K., Shi Z., and Zhou Y. Downlink MIMO in LTE-advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *IEEE Communications Magazine*. 2012. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6146493> DOI: 10.1109/MCOM.2012.6146493 (Дата обращения: 10.11.2020).
2. Rangan S., Rappaport T. S., Erkip E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges *Proceedings of the IEEE*. 2014. Доступно по: <https://arxiv.org/pdf/1401.2560.pdf> DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397 (Дата обращения: 10.11.2020).
3. Atapattu S., Jing Y., Jiang H., Tellambura C. Relay selection and performance analysis in multiple-user networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2013. Доступно по: <https://arxiv.org/pdf/1110.4126.pdf> DOI: 10.1109/JSAC.2013.130815 (Дата обращения: 12.10.2020).
4. Atapattu S., Dharmawansa P., Di Renzo M., Tellambura C., Evans J. S. Multi-user relay selection for full-duplex radio. *IEEE Transactions on Communications*. 2019. Доступно по: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02395808> DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2877393 (Дата обращения: 10.11.2020).
5. Liu Z., Lin M., Wierman A., Low S. H., Andrew L.L.H. Greening geographical load balancing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011. Доступно по: https://www.researchgate.net/publication/221596480_Greening_Geographical_Load_Balancing DOI: 10.1109/TNET.2014.2308295 (Дата обращения: 20.11.2020).
6. Farahnakian F., Liljeberg P., Plosila J. Energy-efficient virtual machines consolidation in cloud data centers using reinforcement learning. *22nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*. 2014. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6787321> DOI: 10.1109/PDP.2014.109 (Дата обращения: 27.09.2020).
7. Chen X., Jiao L., Li W., Fu X. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2016. Доступно по: <https://arxiv.org/pdf/1510.00888.pdf> DOI: 10.1109/TNET.2015.2487344 (Дата обращения: 01.10.2020).
8. Рожкова Т.С. Подходы к использованию аукционных методов для управления ресурсами в распределенной вычислительной системе. *Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2020»*. 2020;2:64-67.
9. Tompkins M.F. Optimization Techniques for Task Allocation and Scheduling in Distributed Multi-Agent Operations. *Massachusetts Institute of Technology*. 2003.

- Доступно по: <https://core.ac.uk/download/pdf/4384944.pdf> (Дата обращения 17.11.2020).
10. Chen L., Zhou S., Xu J. Computation Peer Offloading for Energy-Constrained Mobile Edge Computing in Small-Cell Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2018. Доступно по: <https://arxiv.org/pdf/1703.06058.pdf> DOI: 10.1109/TNET.2018.2841758 (Дата обращения: 08.10.2020).
 11. Mao Y., Zhang J., Song S.H., Letaief K.B. Stochastic Joint Radio and Computational Resource Management for Multi-User Mobile-Edge Computing Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7956189> DOI: 10.1109/TWC.2017.2717986 (Дата обращения: 26.10.2020).
 12. Boyd S. P., Vandenberghe L. Convex optimization. *Cambridge University Press*. 2004. Доступно по: https://web.stanford.edu/~boyd/cvxbook/bv_cvxbook.pdf (Дата обращения: 07.11.2020).

REFERENCES

1. Liu L., Chen R., Geirhofer S., Sayana K., Shi Z., and Zhou Y. Downlink MIMO in LTE-advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *IEEE Communications Magazine*. 2012. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6146493> DOI: 10.1109/MCOM.2012.6146493 (Accessed: 10th November 2020).
2. Rangan S., Rappaport T. S., Erkip E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges *Proceedings of the IEEE*. 2014. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1401.2560.pdf> DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397 (Accessed: 10th November 2020).
3. Atapattu S., Jing Y., Jiang H., Tellambura C. Relay selection and performance analysis in multiple-user networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2013. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1110.4126.pdf> DOI: 10.1109/JSAC.2013.130815 (Accessed: 12th October 2020).
4. Atapattu S., Dharmawansa P., Di Renzo M., Tellambura C., Evans J. S. Multi-user relay selection for full-duplex radio. *IEEE Transactions on Communications*. 2019. Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02395808> DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2877393 (Accessed: 10th November 2020).
5. Liu Z., Lin M., Wierman A., Low S. H., Andrew L.L.H. Greening geographical load balancing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011. Available from: https://www.researchgate.net/publication/221596480_Greening_Geographical_Load_Balancing DOI: 10.1109/TNET.2014.2308295 (Accessed: 20th November 2020).
6. Farahnakian F., Liljeberg P., Plosila J. Energy-efficient virtual machines consolidation in cloud data centers using reinforcement learning. *22nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*. 2014. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6787321> DOI: 10.1109/PDP.2014.109 (Accessed: 27th September 2020).
7. Chen X., Jiao L., Li W., Fu X. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2016. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1510.00888.pdf> DOI: 10.1109/TNET.2015.2487344 (Accessed: 1st October 2020).
8. Rozhkova T.S. Podhody k ispol'zovaniju aukcionnyh metodov dlja upravlenija resursami v raspredelennoj vychislitel'noj sisteme. *Materials of the international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists "Scientific session of TUSUR-2020"*. 2020;2:64-67.

9. Tompkins M.F. Optimization Techniques for Task Allocation and Scheduling in Distributed Multi-Agent Operations. *Massachusetts Institute of Technology*. 2003. Available from: <https://core.ac.uk/download/pdf/4384944.pdf> (Accessed: 17th November 2020).
10. Chen L., Zhou S., Xu J. Computation Peer Offloading for Energy-Constrained Mobile Edge Computing in Small-Cell Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2018. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1703.06058.pdf> DOI: 10.1109/TNET.2018.2841758 (Accessed: 8th October 2020).
11. Mao Y., Zhang J., Song S.H., Letaief K.B. Stochastic Joint Radio and Computational Resource Management for Multi-User Mobile-Edge Computing Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7956189> DOI: 10.1109/TWC.2017.2717986 (Accessed: 26th October 2020).
12. Boyd S. P., Vandenberghe L. Convex optimization. *Cambridge University Press*. 2004. Available from: https://web.stanford.edu/~boyd/cvxbook/bv_cvxbook.pdf (Accessed: 7th November 2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATIONS ABOUT THE AUTHORS

Рожкова Татьяна Сергеевна, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, Россия
Tatyana S. Rozhkova, employee of The Federal Guard Service Academy, Oryol, Russia
e-mail: lebedenko_eugene@mail.ru

Афанасьев Вадим Владимирович, к-т тех. наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, Россия
Vadim V. Afanaciev, PhD, employee of The Federal Guard Service Academy, Oryol, Russia
e-mail: lebedenko_eugene@mail.ru

Ветров Игорь Иванович, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, Россия
Igor I. Vetrov, employee of The Federal Guard Service Academy, Oryol, Russia
e-mail: lebedenko_eugene@mail.ru