

**Никитина Алла Валерьевна** – Южный федеральный университет, e-mail: nikitina.vm@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896260069; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; д.т.н.; профессор.

**Чистяков Александр Евгеньевич** – Донской государственный технический университет; e-mail: cheese\_05@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89508593872; кафедра математики и информатики; д.т.н.

**Gracheva Natalia Nikolaevna** – Azov-Black Sea Engineering Institute of the Don State Agrarian University; e-mail: nata.grachewa2011@yandex.ru; Zernograd, Russia; phone: +79081908999; the department of mathematics and bioinformatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Litvinov Vladimir Nikolaevich** – e-mail: litvinovvn@rambler.ru; phone: +79185172138; the department of mathematics and bioinformatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Rudenko Nelly Borisovna** – e-mail: nelli-rud@yandex.ru; phone: +79081908999; the department of mathematics and bioinformatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Nikitina Alla Valerievna** – Southern Federal University; e-mail: nikitina.vm@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79896260069; the department of Intelligent and multiprocessor systems; dr. of eng. sc.; professor.

**Chistyakov Alexander Evgen'evich** – Don State Technical University; e-mail: cheese\_05@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79508593872; the department of mathematics and informatics; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-105-119

**И.Б. Сафроненкова, А.Б. Клименко**

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В ГРУППЕ БПЛА\***

*Рассмотрена проблема распределения вычислительной нагрузки в группе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при осуществлении мониторинга некоторой области в изменяющихся условиях внешней среды, которая оказывает непосредственное влияние на потребление бортового энергоресурса. Описан один из этапов решения задачи мониторинга, осуществляемого гетерогенной группой БПЛА, заключающийся в распределении БПЛА по полосам сканирования. Отмечено, что при выполнении данного этапа, отсутствует возможность учета факторов влияния окружающей среды, что важно ввиду ограниченности бортовых энергоресурсов. В связи с этим, весьма вероятна ситуация, когда БПЛА не в состоянии выполнить назначенную на него подзадачу, что ставит под угрозу выполнения всей миссии группы. Во избежание данной ситуации, предложено использовать методику принятия решения о необходимости перераспределения нагрузки в группе мобильных роботов (МР). В основе принятия решения лежит процедура онтологического анализа, позволяющая ограничить число вариантов для переноса нагрузки. Разработана модель онтологии распределения вычислительной нагрузки в группе БПЛА, учитывающая возможность привлечения дополнительной производительности либо за счет ресурсов соседних БПЛА, либо за счет устройств «туманного» слоя. Приведены примеры продукционных правил, на основе которых принимается решение о необходимости переноса нагрузки. Показано, что при увеличении числа изменений условий окружающей среды, время использования дополнительных вычислительных ресурсов уменьшается, что, приводит к необходимости привлечения их большего объема для выполнения поставленной задачи. Проведена сравнительная оценка объема привлекаемых ресурсов при реализации двух методов-аналогов решения*

\* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №20-04-60485 и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН АААА-А19-119011190173-6.

задачи переноса вычислительной нагрузки в зависимости от частоты изменений условий окружающей среды. Результаты вычислительных экспериментов показали, что эффективность применения метода на основе онтологического анализа в динамичной среде выше, чем метода на основе ЛГУ (локальных групп устройств). Это позволяет увеличить время совместного выполнения миссии группой роботов.

Группа БПЛА; мониторинг; онтология; распределение вычислительной нагрузки; «туманные» вычисления; «облачные» вычисления.

I.B. Safronenkova, A.B. Klimenko

## THE ESTIMATION OF CHANGING ENVIRONMENTAL CONDITIONS INFLUENCE ON THE WORKLOAD DISTRIBUTION IN THE UAV GROUP

*The paper considers the problem of workload distribution in a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) when monitoring a certain area in a changing environment, which has a direct impact on the onboard energy resources consumption. The stage of a monitoring problem-solving, which includes the distribution of UAVs over scanning bands, is described here. When this stage is carried, there is no opportunity to take into account the factors of environmental impact. But these factors are crucial due to the limited onboard energy resources. In this regard, a situation is very likely when the UAV is not able to complete the sub-task assigned to it, which jeopardizes the completion of the entire mission of the group. To avoid this situation, it is proposed to use the technique of a decision-making on the need to relocate the workload in a group of mobile robots (MR). The decision-making is based on the ontological analysis procedure, which allows limiting the number of choices for workload relocation. The ontology model of the workload distribution in a group of UAVs was developed. This model takes into account the possibility of additional performance involvement either by means of the resources of neighboring UAVs, or by means of devices of the "foggy" layer. Examples of production rules are given, on the basis of which a decision is made on the need to relocate the workload. A comparative estimation of the resources volume involved in the implementation of two methods of workload relocation problem solving, depending on the frequency of changes in environmental conditions, is carried out. The results of computational experiments have shown that the method based on ontological analysis is more efficient in comparison with the method based on LDG (Local Device Group) in terms of the amount of resources involved. This makes it possible to increase the time of joint mission implementation by the UAV group.*

*UAV group; monitoring; ontology; workload relocation; fog-computing; cloud-computing.*

**Введение.** В настоящее время системы мониторинга и диагностики находят широкое применение во многих областях человеческой деятельности: в промышленном производстве и на объектах инфраструктуры для оценки состояния сложных технических объектов [1], в социально-экономической сфере для оценки и принятия управленческих решений [2], в здравоохранении [3], в сфере наблюдения за природными явлениями и предотвращения их опасных последствий [4]. Большое разнообразие сфер применения систем мониторинга и диагностики, наряду с высокими требованиями (быстродействие, надежность, возможность решения поставленных задач в режиме реального времени) [5, 6], предъявляемыми к таким системам, актуализирует проблему их эффективного функционирования в сложных условиях.

Наиболее перспективной архитектурой подсистем управления сложными системами является распределенная архитектура на базе технологий «облачных», «туманных» и «краевых» вычислений [7–9]. Такая архитектура подразумевает решение общих задач (в том числе, задач управления) в «облачном» слое, а задачи сбора данных и их предварительная обработка решаются, как правило, за счет устройств «туманного» и «краевого» слоев.

Зачастую, одним из компонентов систем мониторинга является группа мобильных роботов. Например, в работе [10], предложено использовать мультиробототехнический комплекс на базе гетерогенной группы БПЛА в качестве компонента системы мониторинга. Применение мультиробототехнических комплексов позво-

ляет снизить противоречивые и трудно достижимые требования, предъявляемые к отдельным многофункциональным роботам группы. Групповое применение роботов, зачастую, не предполагает наличие на борту какого-либо значительного энергоресурса, что, в свою очередь позволяет миниатюризировать размеры МР. Однако данный подход также имеет ряд недостатков, среди которых ограниченный бортовой энергоресурс и радиус действия МР. Для решения данной проблемы в состав группы МР вводят роботов-ретрансляторов, которые при наличии ресурсов могут выполнять также функции лидеров группы и «хранилища» данных.

Важно отметить, что окружающая среда, в которой МР выполняет поставленные перед ним задачи, оказывает непосредственное влияние на объем расходуемых бортовых ресурсов [11, 12]. Например, при выполнении мониторинга, одной из задач является построение оптимальной траектории перемещения робота (группы роботов), которая весьма трудоемкая и может решаться, в том числе, с использованием графовых моделей [13]. Изменяющиеся условия окружающей среды приводят к необходимости многократного пересчета траектории, что актуализирует вопрос об эффективном расходе имеющихся бортовых ресурсах. В противном случае, может сложиться ситуация, когда выполнение поставленной перед МР задачи становится невозможным.

В данной работе предложена методика, включающая процедуру онтологического анализа и позволяющая принять решение о необходимости перераспределения вычислительной нагрузки в группе МР на примере решения задачи сканирования некоторой области гетерогенной группой БПЛА под управлением БПЛА-лидера с учетом изменяющихся условий окружающей среды.

**Подзадача распределения БПЛА по полосам сканирования.** Формальная постановка задачи мониторинга, осуществляемого гетерогенной группой БПЛА, приведена в работе [14] и предполагает выполнение нескольких этапов, последний из которых заключается в определении конкретной полосы (траектории) сканирования для каждого БПЛА подгруппы.

После того, как БПЛА  $R_j$  ( $j \in [1, N]$ ) группы распределены по подобластям сканирования, необходимо определить конкретную полосу сканирования для каждого БПЛА.

Пусть для сканирования подобласти  $S_s$  выделено  $N_s$  БПЛА. То есть подобласть  $S_s$  разделена на  $N_s$  полос шириной не более  $L$ .

Сначала нужно определить так называемые точки входа-выхода БПЛА для каждой полосы. Для каждой полосы может быть определено по две такие точки, что иллюстрируется рис. 1.

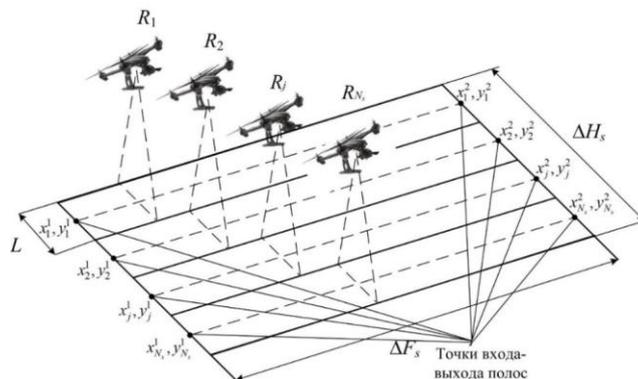


Рис. 1. Точки входа-выхода полос сканирования

Координаты точек входа и выхода  $x_{j_s}^1, y_{j_s}^1 >$  и  $x_{j_s}^2, y_{j_s}^2 >$  ( $j = \overline{1, N_s}$ ), определяемыми выражениями

$$\begin{cases} \bar{x}_{j_s}^1 = x_s^c - \frac{\Delta F_s}{2}, \\ \bar{y}_{j_s}^1 = y_s^c - \frac{\Delta H_s}{2} + (j_s - 1) \cdot L + \frac{L}{2}, \\ x_{j_s}^1 = x_s^c + (\bar{x}_{j_s}^1 - x_s^c) \cdot \cos \varphi_s - (\bar{y}_{j_s}^1 - y_s^c) \cdot \sin \varphi_s, \\ y_{j_s}^1 = y_s^c + (\bar{x}_{j_s}^1 - x_s^c) \cdot \sin \varphi_s + (\bar{y}_{j_s}^1 - y_s^c) \cdot \cos \varphi_s. \end{cases} \quad (1)$$

и

$$\begin{cases} \bar{x}_{j_s}^2 = x_s^c + \frac{\Delta F_s}{2}, \\ \bar{y}_{j_s}^2 = y_s^c - \frac{\Delta H_s}{2} + (j_s - 1) \cdot L + \frac{L}{2}, \\ x_{j_s}^2 = x_s^c + (\bar{x}_{j_s}^2 - x_s^c) \cdot \cos \varphi_s - (\bar{y}_{j_s}^2 - y_s^c) \cdot \sin \varphi_s, \\ y_{j_s}^2 = y_s^c + (\bar{x}_{j_s}^2 - x_s^c) \cdot \sin \varphi_s + (\bar{y}_{j_s}^2 - y_s^c) \cdot \cos \varphi_s, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta F_s$  – длина области сканирования  $S_s$ ;

$\Delta H_s$  – ширина области сканирования  $S_s$ ;

$L$  – ширина полосы сканирования БПЛА;

$\varphi_s$  – угол ориентации подобласти сканирования  $S_s$ ;

$x_s^c, y_s^c >$  – координаты геометрических центров подобластей сканирования;

$\bar{x}_{j_s}^1, \bar{y}_{j_s}^1 >$ ,  $\bar{x}_{j_s}^2, \bar{y}_{j_s}^2 >$  – промежуточные значения координат центров полос до поворота на угол  $\varphi_s$ .

Полученные значения координат точек входа-выхода полос своей подобласти каждый БПЛА-«лидер»  $RL_s$  заносит в распределенный реестр, чтобы эти значения были доступны для остальных БПЛА-«лидеров».

Так как на предыдущем шаге было определено, что численность подгруппы соответствует количеству полос сканирования, на которые может быть разделена соответствующая подобласть, то каждому БПЛА  $R_{j_s}$  ( $j_s \in [1, N_s]$ ) БПЛА-«лидер»  $RL_s$ , назначенный на данную подобласть определяет полосу сканирования, опять же используя один из указанных выше алгоритмов решения задачи о назначениях.

Однако предварительно необходимо определить для каждой полосы каждой подобласти точки входа  $x_{j_s}^1, y_{j_s}^1 >$  или  $x_{j_s}^2, y_{j_s}^2 >$ . Во избежание аварийных ситуаций в примыкающих (смежных) по длине подобластях области  $P_i$ , движение БПЛА  $R_{j_s}$  ( $j_s \in [1, N_s]$ ) осуществлялось в одну сторону.

Решение о выборе точек входа для своей подгруппы принимают соответствующие БПЛА-«лидеры», например, по минимуму суммарных перемещений БПЛА  $R_{j_s}$  ( $j_s \in [1, N_s]$ ), назначенных на эти подобласти.

**Методика принятия решения о необходимости перераспределения нагрузки в группе БПЛА.** В рамках данной работы, будем полагать, что группа БПЛА должна выполнять сканирование некоторой области, причем распределенная архитектура подсистемы управления данным процессом должна быть реализована на базе технологий «облачных», «туманных» и «краевых» вычислений (рис. 2).

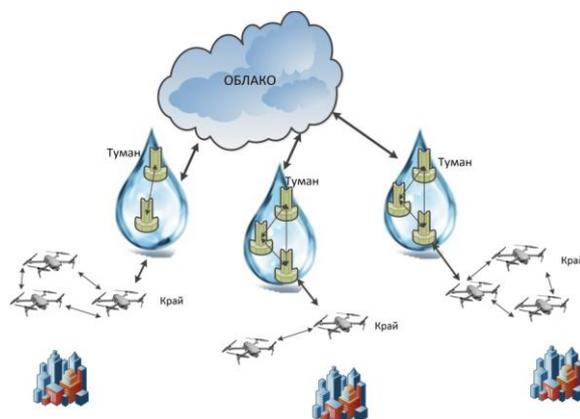


Рис. 2. Архитектура подсистемы управления на базе технологий «облачных», «туманных» и «краевых» вычислений

Поскольку условия окружающей среды, в которой функционирует группа БПЛА, трудно предсказуемы, изменчивы, и оказывают непосредственное влияние на объем расходуемых бортовых ресурсов, то после назначения полос сканирования на каждый БПЛА, может сложиться ситуация, связанная с невозможностью выполнения подзадачи определенным БПЛА ввиду ограниченности его ресурсов. Групповое взаимодействие роботов подразумевает совместное решение общей задачи, т.е. каждый робот должен действовать в интересах всех группы для успешного выполнения миссии. В случае, если бортовых ресурсов БПЛА недостаточно для выполнения поставленной перед ним задачи, возможны следующие варианты решений данной проблемы:

1. Перераспределение нагрузки между БПЛА, входящих в подгруппу, таким образом, чтобы миссия, возложенная на данную подгруппу, была выполнена в срок.
2. Привлечение дополнительных ресурсов за счет устройств «туманного» слоя для выполнения данной подзадачи.
3. Перераспределение полос сканирования.

Будем полагать, что каждый БПЛА осведомлен о состоянии ресурсов и локализации в пространстве своих соседей, которые находятся в пределах прямой видимости в контексте коммуникационной сети. Каждый БПЛА подгруппы с некоторой периодичностью отправляет данные о состоянии своих ресурсов и о своем положении в пространстве БПЛА-лидеру. Таким образом, каждый БПЛА способен оценить состояние своих ресурсов для решения выделенной ему подзадачи. Если этих ресурсов недостаточно, то БПЛА, имея сведения о соседних БПЛА, формирует предложение БПЛА-лидеру о возможном варианте переноса нагрузки на вычислительные ресурсы соседнего БПЛА. БПЛА-лидер, в свою очередь, принимает решение о целесообразности или нецелесообразности данного переноса. В случае, если БПЛА не находит вариантов для переноса нагрузки из числа своих соседей, то, он сообщает об этом лидеру, и тот принимает решение либо о привлечении дополнительных ресурсов из «туманного» слоя, либо о перераспределении полос сканирования. Данные решения БПЛА-лидер принимает на основании продукционных правил, применяемых к модели онтологии, в которой отражена информация о переносимой задаче, сведения о ресурсах и локализации БПЛА, входящих в рассматриваемую подгруппу, и сведения о ресурсах и локализации устройств «туманного» слоя. Методика принятия решения о необходимости переноса вычислительной нагрузки внутри гетерогенной группы БПЛА под управлением лидера представлена на рис. 3.

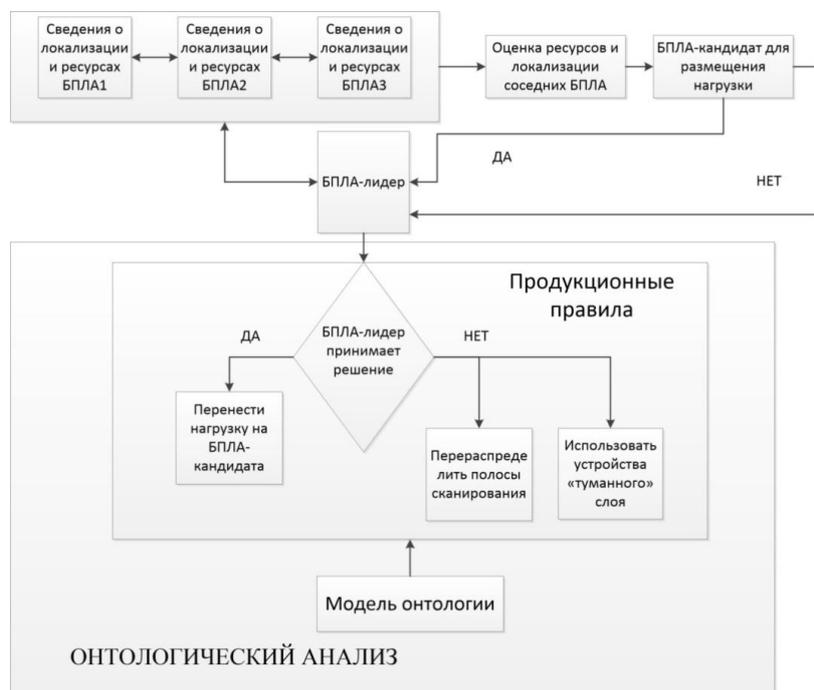


Рис. 3. Схема методики принятия решения о необходимости переноса вычислительной нагрузки

Процедура онтологического анализа показала свою эффективность в решении задач переноса вычислительной нагрузки в распределенных системах различного назначения и подробно описана в работах [15, 16]. Ключевая идея онтологического анализа заключается в сокращении пространства поиска узлов-кандидатов для размещения вычислительной нагрузки в распределительной задаче, что сокращает время принятия решения о размещении. Сравнительная схема решения задачи переноса вычислительной нагрузки приведена на рис. 4,а,б).

Данная процедура включает в себя выполнение следующих этапов:

1. Классификация совокупности входных данных в соответствии с классами онтологии, описывающей рассматриваемую область.
2. Применение системы продукционных правил к классам онтологии с целью ограничения множества вычислительных узлов, полученного в результате сбора сведений об имеющихся ресурсах.
3. Принятие решения о предпочтительном множестве узлов для переноса вычислительной нагрузки.

В соответствии с предложенной методикой необходимо разработать модель онтологии, описывающей область распределения нагрузки внутри гетерогенной группы БПЛА с учетом влияния факторов окружающей среды, и продукционные правила, на основании которых происходит принятие решения о необходимости переноса нагрузки.

Разработка модели онтологии распределения нагрузки в гетерогенной группе БПЛА, функционирующей в изменяющихся условиях окружающей среды. На основании методологии, описанной в [17] в настоящей работе разработана модель онтологии распределения вычислительной нагрузки в гетерогенной группе БПЛА, функционирующих в условиях изменяющейся среды.

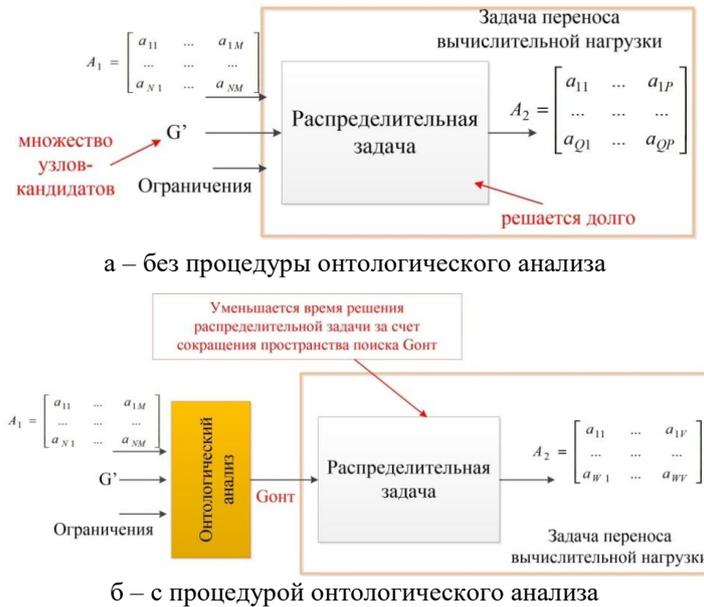


Рис. 4. Схемы решения задачи переноса вычислительной нагрузки

Для полного и корректного описания рассматриваемой предметной области в виде модели онтологии, необходимо сформировать множество концептов, которые будут отражены в онтологии в виде иерархии классов.

Таким образом, модель онтологии включает следующие концепты (рис. 5):

- ◆ Окружающая среда: скорость и направление ветра, осадки, препятствия.
- ◆ БПЛА: ресурсы (производительность, энергоресурс, загруженность), ширина полосы сканирования, скорость сканирования, текущие координаты в пространстве.
- ◆ «Туманный» слой: производительность, загруженность, координаты в пространстве.
- ◆ Задача: тип, вычислительная сложность, срок исполнения, объемы передаваемых и получаемых данных.
- ◆ Оптимизируемый параметр: площадь сканирования, время выполнения миссии.



Рис. 5. Иерархия классов модели онтологии

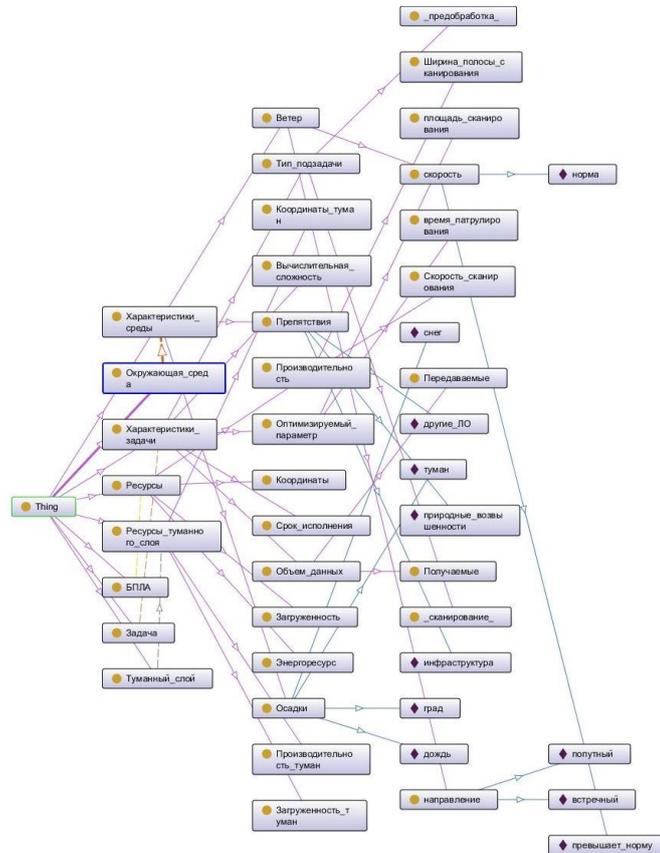


Рис. 6. Модель онтологии распределения нагрузки в гетерогенной группе БПЛА под управлением лидера

Разработка продукционных правил распределения вычислительных ресурсов в группе БПЛА, функционирующих в условиях изменяющейся среды. В основе этапа принятия решения о предпочтительном БПЛА, готовом выделить часть своих ресурсов для решения некоторой подзадачи, изначально назначенной на другой БПЛА, лежит система продукционных правил, которая связывает класс онтологии, описывающей область распределения нагрузки внутри гетерогенной группы БПЛА с учетом влияния факторов окружающей среды. Основой для разработки продукционных правил послужили главные принципы распределения подзадач по процессорам в гетерогенных вычислительных системах [18, 19].

При разработке продукционных правил будем полагать следующее:

1. Каждый БПЛА, входящий в подгруппу имеет ограниченный бортовой ресурс и радиус действия коммуникационных сетей.
2. Устройства «туманного» слоя статичны и обладают некоторыми вычислительными ресурсами.

*Случай 1.* Рассмотрим случаи возможного перераспределения нагрузки между МР, входящих в подгруппу.

**ЕСЛИ** характеристики задачи {тип\_задачи = сканирование; вычислительная сложность=Θ; оптимизируемый\_параметр = время\_выполнения\_миссии; объем\_данных=большой; срок\_исполнения=Γ} **И** характеристики среды {осадки = дождь, ветер = встречный, препятствия = нет} **И ресурсы** {загруженность = ψ; коорди-

наты =  $x_j, y_j$  >; скорость\_сканирования =  $V_j$ ; ширина\_полосы\_сканирования =  $L_j$  }  
 соответствуют характеристики задачи **ТО** переносить на БПЛА { $d_i = \min$  }  
 где  $d_i$  – расстояние от БПЛА, на который изначально была назначена подзадача, до БПЛА, который способен выполнить ее в срок.

*Случай 2.* Если среди МР, входящих в подгруппу, невозможно перераспределить задачу, то необходимо воспользоваться ресурсами «туманного» слоя

**ЕСЛИ** характеристики задачи {тип\_задачи = сканирование; вычислительная сложность=Θ; оптимизируемый\_параметр = время\_выполнения\_миссии; объем\_данных=большой; срок\_исполнения=Т} **И** характеристики среды {осадки = дождь, ветер = встречный, препятствия = нет} **И ресурсы** {загруженность =  $\psi$ ; координаты =  $x_j, y_j$  >; скорость\_сканирования =  $V_j$ ; ширина\_полосы\_сканирования =  $L_j$  } не соответствуют характеристики задачи **ТО** переносить на узел в «тумане» {загруженность\_туман =  $\psi_T$ ; производительность\_туман =  $\rho_T$ ; координаты-туман =  $\langle x_T, y_T \rangle$ ;  $d_i = \min$  }

где  $d_i$  – расстояние от БПЛА, на который изначально была назначена подзадача, до узла, расположенного в «туманном» слое, способном выполнить ее в срок.

Работоспособность предложенного подхода была проверена с использованием вычислительных экспериментов.

**Вычислительный эксперимент.** Предположим что, собственных бортовых энергоресурсов БПЛА недостаточно для решения поставленной задачи. В этом случае необходимо перераспределить вычислительную нагрузку таким образом, чтоб общая миссия завершилась успешно, т.е. решить задачу перераспределения нагрузки за ограниченное время, в течение которого все БПЛА группы способны выполнять поставленные перед ними задачи. В соответствии с описанной выше методикой распределения вычислительной нагрузки, существует два варианта решения сложившейся проблемы: распределение нагрузки между БПЛА группы и привлечение ресурсов из «туманного» слоя. В обоих случаях речь идет об использовании дополнительных ресурсов. Стоит также отметить, что в данных случаях имеют место изменяющиеся условия среды (изменяющиеся расстояния между БПЛА-лидером или между БПЛА), которые оказывают непосредственное влияние на распределение нагрузки. Например, если БПЛА-лидер в процессе сканирования достаточно удален от устройства «туманного» слоя, то передача данных для обработки на данное устройство нецелесообразна. Поднимается вопрос о смене ролей в группе МР, что, с большой вероятностью, приведет к необходимости решения задачи перераспределения нагрузки. Далее будем полагать, что количество изменений условий среды равно количеству перераспределений нагрузки. В свою очередь, объем привлекаемых ресурсов прямо пропорционален времени использования данных ресурсов:

$$W_{дон} = T_{удн} \cdot P_{удн} \quad (3)$$

где  $W_{дон}$  – объем привлекаемых дополнительных ресурсов;

$T_{удн}$  – время использования дополнительных ресурсов;

$P_{удн}$  – дополнительная производительность привлекаемых устройств.

При ограниченных значениях производительности устройств для выполнения большего объема работы, необходимо увеличить время использования дополнительных ресурсов с учетом изменений условий окружающей среды:

$$T_{удн} = T_{кфз} - N \cdot T_{пви} \quad (4)$$

где  $T_{кфз}$  – время выполнения задачи сканирования выделенной области;

$N$  – количество перераспределений вычислительной нагрузки в единицу времени;

$T_{пви}$  – время решения задачи переноса вычислительной нагрузки.

Из формул (3), (4), видно, что объем привлекаемых ресурсов ( $W_{доп}$ ) зависит от количества перераспределений  $N$  и времени, необходимого для осуществления перераспределений  $T_{пер}$ . Дадим пояснения в контексте решаемой задачи. Пусть после назначения каждому БПЛА подгруппы полосы сканирования, возникает ситуация, что имеющихся ресурсов недостаточно для выполнения миссии. В этом случае необходимо перераспределить нагрузку между БПЛА группы или дополнительно привлечь устройства «туманного» слоя, причем сделать это как можно быстрее. Вопросы, связанные с минимизацией параметра  $T_{пер}$  были подробно рассмотрены в работах [20, 21].

Для подтверждения эффективности предложенной методики, проведены вычислительные эксперименты, включающие сравнительный анализ методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки на основе онтологий и ЛГУ. Последний выбран в качестве метода-аналога ввиду того, что большинство существующих методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки не учитывают гетерогенность, наличие транзитных участков сети или имеют высокую вычислительную сложность. В ходе экспериментальных исследований было получено, что время реализации метода на основе онтологий в среднем в 2,51 раза меньше времени реализации метода на основе ЛГУ [20]. Графики, отражающие объемы привлекаемых ресурсов в зависимости от количества изменений условий среды для различных поисковых алгоритмов при реализации методов-аналогов решения задачи переноса вычислительной нагрузки, приведены на рис. 7–10.

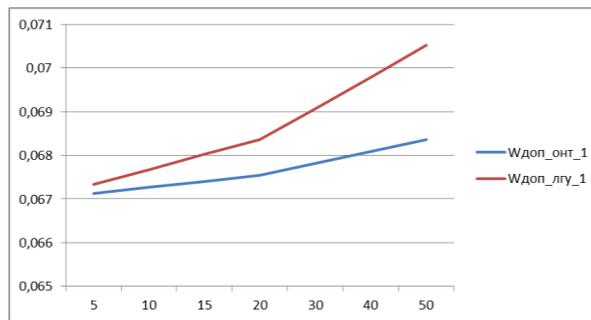


Рис. 7. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологий и метода на основе ЛГУ от  $N$  при  $T_{пер} = 1/1000T_{фз}$  для алгоритма обезьян

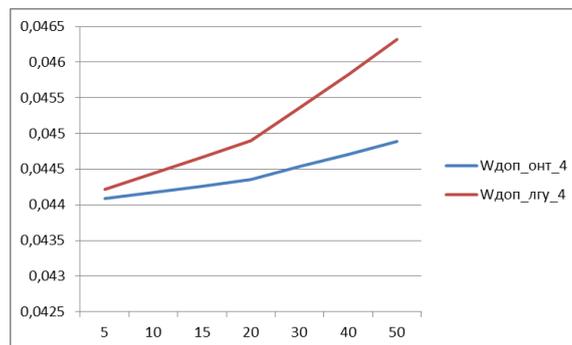


Рис. 8. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологий и метода на основе ЛГУ от  $N$  при  $T_{пер} = 1/1000T_{фз}$  для метода отжига

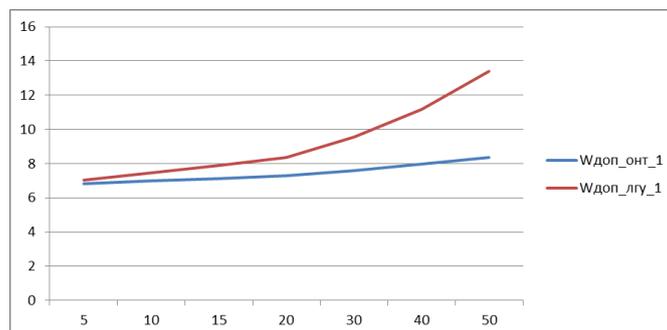


Рис. 9. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологии и метода на основе ЛГУ от  $N$  при  $T_{\text{пвн}}=1/100T_{\text{фз}}$  для алгоритма обезьян

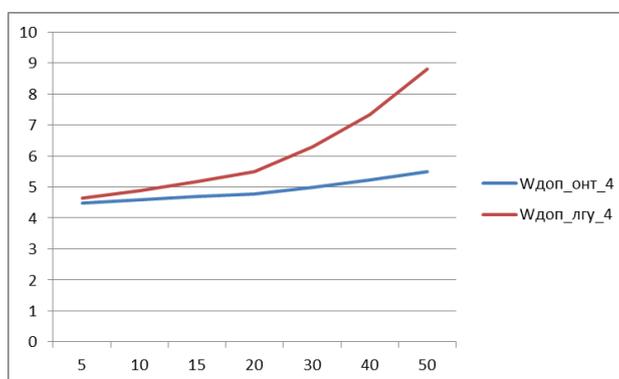


Рис. 10. Зависимость объема привлекаемых ресурсов при реализации метода на основе онтологии и метода на основе ЛГУ от  $N$  при  $T_{\text{пвн}}=1/100T_{\text{фз}}$  для метода отжига

На основе приведённых графиков можно сделать следующие выводы:

1. С ростом числа перераспределений вычислительной нагрузки происходит увеличение объема привлекаемых ресурсов.
2. Использование метода на основе онтологий позволяет привлекать до 3 % меньше дополнительных ресурсов в сравнении с методом на основе ЛГУ при  $T_{\text{пвн}}=1/1000T_{\text{фз}}$  и до 60% при  $T_{\text{пвн}}=1/100T_{\text{фз}}$ , поскольку занимает меньше времени для принятия решения о переносе нагрузки.
3. Эффективность использования метода на основе онтологий в динамичной среде выше по сравнению с методом на основе ЛГУ.

**Заключение.** Настоящая работа посвящена проблеме распределения вычислительной нагрузки в гетерогенной группе БПЛА, осуществляющих мониторинг местности в изменяющихся условиях окружающей среды. Как известно, факторы внешней среды оказывают непосредственное влияние на объем расходуемых МР ресурсов, что влияет на успешность выполнения миссии. Для предотвращения ситуаций, когда выполнение миссии находится под угрозой, ввиду недостаточности собственных ресурсов БПЛА, была разработана методика, позволяющая принять решение о необходимости переноса нагрузки. В основе данной методики лежит процедура онтологического анализа, позволяющая ограничить множество вариантов для перераспределения нагрузки в каждом конкретном случае и ускорить процесс

принятия решения. Разработаны модель онтологии распределения вычислительных ресурсов, позволяющая учесть, в том числе факторы влияния внешней среды, и примеры продукционных правил, на основании которых происходит принятие решения о необходимости переноса. Исследованы зависимости объема привлекаемых ресурсов от частоты изменения условий внешней среды для методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки на основе онтологического анализа и на основе ЛГУ. Результаты проведенных экспериментов показали, что реализация метода на основе онтологий позволяет привлекать на 3% меньше ресурсов при  $T_{\text{пен}}=1/1000T_{\text{фз}}$  и до 60% при  $T_{\text{пен}}=1/100T_{\text{фз}}$  в сравнении с методом на основе ЛГУ. Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод на основе онтологий более устойчив к изменениям внешней среды. Это позволяет увеличить время совместного выполнения миссии группой роботов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Захаров Н.С., Резников Д.О. и др. Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем: учебное пособие. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 632 с.
2. Демешко Т.С. Понятие, сущность, задачи мониторинга и прогноза в системе управления регионом // Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки. – 2020. – № 13. – С. 57-63.
3. Фролов С.В., Лядов М.А., Комарова И.А., Остапенко О.А. Современные тенденции развития медицинских информационных систем мониторинга // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2013. – № 2 (46). – С. 66-75.
4. Капустян С.Г., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В. Метод робастно устойчивого управления движением группы мобильных роботов с «лидером» для систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры // Наука Юга России. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 66-73.
5. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
6. ГОСТ Р 56875-2016. Информационные технологии. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий. – М.: Стандартинформ, 2019. – 40 с.
7. Кирсанова А.А., Радченко Г.И., Черных А.Н. Обзор технологий организации туманных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2020. – № 9 (3). – С. 35-63.
8. Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 112. – P. 630-640.
9. Naeem R.Z., Bashir S., Amjad M.F., Abbas H., and Afzal H. Fog computing in internet of things: Practical applications and future directions // Peer-to-Peer Networking and Applications. – 2019. – Vol. 12, No. 5. – P. 1236-1262.
10. Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Информационное обеспечение групповых действий БЛА при решении задач мониторинга больших территорий // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов: Матер. II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова ("Опасные явления - II"). г. Ростов-на-Дону (6–10 июля 2020 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. – С. 332-335.
11. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. – Вып. № 1. – С. 7-15.

12. БПЛА в условиях арктического региона // Neftegaz.ru. – 2019. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/473748-bpla-v-usloviyakh-arkticheskogo-regiona>. – Статьи журнала (neftegaz.ru) (дата обращения: 02.07.2021).
13. Мельников А.В., Гайдай В.А., Rogozin E.A. Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска // Вестник воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 52-62.
14. Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж. Метод решения задачи распределения целей в группе БПЛА сетевидной системой управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 12 (185). – С. 55-70.
15. Курейчик В.М., Сафроненкова И.Б. Онтологический подход к реализации технологий распределенных вычислений в сети Интернет // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 71-82.
16. Сафроненкова И.Б., Клименко А.Б. Оценка эффективности методов решения задачи переноса вычислительной нагрузки в «гуманной» среде // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 156-165.
17. Ной Наталья Ф, МакГиннесс Дэбора Л. Разработка онтологий 101: руководство по созданию Вашей первой онтологии. – URL: [http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka\\_ontologiy\\_101\\_ruk.pdf](http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka_ontologiy_101_ruk.pdf) (дата обращения: 02.07.2021).
18. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем: учеб. пособие. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. – 184 с.
19. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с.
20. Мельник Э.В., Сафроненкова И.Б., Клименко А.Б. Формирование ограничений в задаче переноса вычислительной нагрузки в РСАПР как условие повышения качества проектирования // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 357-364.
21. Klimenko A.B., Safronenkova I.B. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 1046. – P. 37-48.

#### REFERENCES

1. Makhutov N.A., Permyakov V.N., Akhmetkhanov R.S., Dubinin E.F., Zakharov N.S., Reznikov D.O. *i dr.* Diagnostika i monitoring sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie [Diagnostics and monitoring of the state of complex technical systems: a textbook]. Tyumen': TIU, 2017, 632 p.
2. Demeshko T.S. Ponyatie, sushchnost', zadachi monitoringa i prognoza v sisteme upravleniya regionom [The concept, essence, tasks of monitoring and forecasting in the regional management system], *Obrazovanie i nauka bez granits: sotsial'no-gumanitarnye nauki* [Education and science without borders: social and humanitarian sciences], 2020, No. 13, pp. 57-63.
3. Frolov S.V., Lyadov M.A., Komarova I.A., Ostapenko O.A. Sovremennye tendentsii razvitiya meditsinskikh informatsionnykh sistem monitoringa [Modern trends in medical information systems for monitoring], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and PracticeVernadsky University], 2013, No. 2 (46), pp. 66-75.
4. Kapustyan S.G., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V. Metod robustno ustoychivogo upravleniya dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov s «liderom» dlya sistem monitoringa i prognozirovaniya opasnykh protsessov i obespecheniya bezopasnosti naseleniya i beregovoy infrastruktury [Method of robustly stable motion control of a group of mobile robots with a leader for monitoring and diagnostics systems and ensuring the safety of the population and coastal infrastructure], *Nauka Yuga Rossii* [Science in the south of Russia], 2021, Vol. 17, No. 2, pp. 66-73.
5. GOST R 53564-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Trebovaniya k sistemam monitoring [Condition monitoring and diagnostics of machines. Hazardous equipment monitoring. Requirements for monitoring systems]. Moscow: Standartinform, 2019, 16 p.
6. GOST R 56875-2016. Informatsionnye tekhnologii. Sistemy bezopasnosti kompleksnye i integrirovannye. Tipovye trebovaniya k arkhitekture i tekhnologiyam intellektual'nykh sistem monitoringa dlya obespecheniya bezopasnosti predpriyatiy i territoriy [Information technology systems for ensuring safety of enterprises and territories]. Moscow: Standartinform, 2016, 16 p.

- gies. Comprehensive and integrated security systems. Standart requirements for the architecture, hardware and software intelligent monitoring systems to ensure the safety of enterprises and territories]. Moscow: Standartinform, 2019, 40 p.
7. Kirsanova A.A., Radchenko G.I., Chernykh A.N. Obzor tekhnologiy organizatsii tumannykh vychisleniy [Overview of fog computing organization technologies], *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering], 2020, No. 9 (3), pp. 35-63.
  8. Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city, *Future Generation Computer Systems*, 2020, Vol. 112, pp. 630-640.
  9. Naeem R.Z., Bashir S., Amjad M.F., Abbas H., and Afzal H. Fog computing in internet of things: Practical applications and future directions, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, Vol. 12, No. 5, pp. 1236-1262.
  10. Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Informatsionnoe obespechenie gruppovykh deystviy BLA pri reshenii zadach monitoringa bol'shikh territoriy [Information support for group actions of uavs when solving problems of monitoring large territories], *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosferykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnyuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov: Mater. II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati chlena-korrespondenta RAN D.G. Matishova ("Opasnye yavleniya - II"). g. Rostov-na-Donu (6–10 iyulya 2020 g.)* [Patterns of formation and impact of marine, atmospheric hazards and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges: Materials of the II International Scientific Conference in Memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D.G. Matishov ("Dangerous Phenomena - II"). Rostov-on-Don (July 6-10, 2020). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTS RAN, 2020, pp. 332-335.
  11. Gorbunov A.A., Galimov A.F. Vliyaniye meteorologicheskikh faktorov na primeneniye i bezopasnost' poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov s bortovym retranslyatorom radiosignala [The influence of meteorological factors on the use and flight safety of unmanned aerial vehicle with side repeater radio], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii* [Scientific and analytical journal bulletin of the St. Petersburg university of the state fire service of the ministry of emergency situations of Russia], 2016, Issue No. 1, pp. 7-15.
  12. BPLA v usloviyakh arkticheskogo regiona [UAVs in the conditions of the Arctic region], *Neftgaz.ru*, 2019. Available at: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/473748-bpla-v-usloviyakh-arkticheskogo-regiona> (accessed 02 July 2021).
  13. Mel'nikov A.V., Gayday V.A., Rogozin E.A. Postroeniye optimal'noy traektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri vypolnenii zadachi poiska [Construction of optimal flight path of unmanned aircraft when performing a search task], *Vestnik voronezhskogo instituta MVD Rossii* [The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2017, No. 1, pp. 52-62.
  14. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Usachev L.Zh. Metod resheniya zadachi raspredeleniya tseley v gruppe BPLA setetsentricheskoy sistemoy upravleniya [The method of solving the problem of the distribution of goals in the group of uavs by network-centric control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 12 (185), pp. 55-70.
  15. Kureychik V.M., Safronenkova I.B. Ontologicheskii podkhod k realizatsii tekhnologiy raspredelennykh vychisleniy v seti Internet [An ontological approach to distributed computing technologies implementation on the internet], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 71-82.
  16. Safronenkova I.B., Klimenko A.B. Otsenka effektivnosti metodov resheniya zadachi perenosa vychislitel'noy nagruzki v «tumanny» srede [The efficiency evaluation of workload relocation problem solving methods in «fog-computing» environment], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences], 2020, No. 12, pp. 156-165.
  17. Noy Natal'ya F, MakGinness Debora L. Razrabotka ontologiy 101: 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](http://www.labrate.ru/20181225/razrabotka_ontologiy_101_ruk.pdf) (accessed 02 July 2021).
  18. Gergel' V.P., Strongin R.G. Osnovy parallel'nykh vychisleniy dlya mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem: ucheb. posobie [Fundamentals of parallel computing for multiprocessor computing systems. Training manual]. Nizhniy Novgorod: Izd-vo NNGU im. N.I. Lobachevskogo, 2003, 184 p.

19. Voevodin V.V., Voevodin V.I. Parallelnye vychisleniya [Parallel computing]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003, 608 p.
20. Mel'nik E.V., Safronenkova I.B., Klimenko A.B. Formirovanie ogranicheniy v zadache perenosa vychislitel'noy nagruzki v RSAPR kak uslovie povysheniya kachestva proektirovaniya [The restrictions forming in the workload relocation problem in DCAD systems as a condition for design quality increasing], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Engineering Sciences], 2021, No. 2, pp. 357-364.
21. Klimenko A.B., Safronenkova I.B. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, Vol. 1046, pp. 37-48.

Статью рекомендовала к опубликованию профессор, д.т.н. Г.В. Горелова.

**Сафроненкова Ирина Борисовна** – Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: safronenkova050788@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79604678753; м.н.с.

**Клименко Анна Борисовна** – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. А.В. Каляева; e-mail: anna\_klimenko@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79085067014; с.н.с.; к.т.н.

**Safronenkova Irina Borisovna** – Southern Federal University; e-mail: safronenkova050788@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79604678753; junior research fellow.

**Klimenko Anna Borisovna** – Research Institute of Multiprocessor Computation Systems n.a. A.V. Kalyaev; e-mail: anna\_klimenko@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085067014; senior research fellow; candidate of technical sciences.