

О. И. Ляхин, руководитель направления аэрокосмических систем, lakhin@smartsolutions-123.ru

Особенности реализации интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции¹

Рассматривается реализация интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции. Система решает проблемы поддержки жизнедеятельности экипажа и обеспечения нормального функционирования Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), а также повышения эффективности принятия решений специалистами РКК "Энергия" при построении программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС. Система реализует метод адаптивного планирования программы полета и грузопотока РС МКС в реальном времени, учитывающий приоритеты, правила, ограничения грузов и транспортных кораблей. Показано, что система способна гибко и эффективно адаптировать программу полета и план грузопотока РС МКС по событиям в реальном времени.

Ключевые слова: Российский сегмент Международной космической станции, адаптивное планирование, мультиагентные системы, программа полета, грузопоток, онтология

Введение

Для нормального функционирования Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) требуется решение большого числа взаимосвязанных задач планирования полетов (включая старты, стыковки и отстыковки) транспортных грузовых и пилотируемых кораблей с учетом различных требований, а также поддержки жизнедеятельности экипажа, доставки на борт РС МКС необходимого оборудования, различных материалов и инструментов. В последнее время при решении данной проблемы многим ученым, инженерам и руководителям приходилось прибегать к миллионам операций, для того чтобы найти компромиссное решение по обеспечению РС МКС всеми необходимыми материалами с учетом множества условий и ограничений. Для того чтобы сократить время принятия решений и увеличить их эффективность, в 2010 г. был запущен проект по разработке интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС.

Для обеспечения целесообразности и эффективности принятия решений с самого начала предполагалось разрабатывать такую систему на основе современных программных средств. Поскольку обеспечение грузами РС МКС может рассматриваться как сложная сеть непрерывно действующих и коэволюционирующих планировщиков, базой для общего решения стала холоническая парадигма на основе мультиагентного подхода [1–2] и подход, основанный на поведении мира живой природы [3], который требует развития новых методов и средств поддержания базовых механизмов самоорганизации и эволюции, присущих живой природе (колонии муравьев, рой пчел и т. д.).

В данной работе представлены результаты разработки и внедрения мультиагентной системы, по-

зволяющей согласованно строить программу полетов космических кораблей и их стыковок к РС МКС, планировать грузопоток и утилизацию грузов, поддерживать уровень топлива, воды и продовольствия на борту, а также управлять экипажем космического корабля. В данной системе был реализован метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС [4], развивающий предложенный ранее метод сопряженных взаимодействий в сетях потребностей и возможностей (ПВ-сетях) за счет использования приоритетов грузов [5–6], обеспечивающий адаптивную обработку событий, не требующую останова и перезапуска системы. Показываются основные преимущества и результаты от внедрения системы.

1. Проблемы и основные особенности планирования

Проблема поддержания эффективного функционирования РС МКС и особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС рассматриваются в работе [7]. Построение программы полета, планирование грузопотока и расчет ресурсов РС МКС состоит из нескольких этапов с разным горизонтом планирования.

На первом этапе создается стратегическая модель грузопотока, которая помогает рассчитать число необходимых полетов транспортных кораблей в год на основе числа ожидаемых экспедиций. Затем начинается процесс интерактивного построения программы полета. На данном этапе определяются и согласовываются всеми заинтересованными сторонами число и время стыковок и отстыковок космических кораблей и модулей РС МКС с учетом периодов возможных стартов космических кораблей, солнечной активности, конфигурации и ожидаемого расположения РС МКС, требований экипажа и т. д. На этом этапе разрабатываются и рассматриваются несколько вариантов программы полета, пока не будет согласован и утвержден окончательный ее вариант.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

На следующем этапе начинается интерактивный процесс планирования грузопотока и расчета баланса топлива и воды. Объемы грузов распределяются по полетам транспортных грузовых и пилотируемых кораблей на основе данных о среднем потреблении ресурсов экипажем и системами станции. Информация о числе космонавтов и о датах стартов и стыковок берется из утвержденной программы полета. Поставки топлива рассчитываются на основе данных о корректировке орбиты РС МКС и затратах топлива на стыковки и другие операции.

Далее план грузопотока дополняется планами размещения грузов на станции, а также утилизации использованных грузов на затопливаемых транспортных грузовых кораблях и возврата на Землю результатов космических экспериментов на транспортных пилотируемых кораблях.

В ходе планирования вырабатываются следующие виды планов:

- программа полетов, представляющая собой график стыковок космических кораблей и модулей (отсеков) РС МКС, учитывающий различные ограничения, такие как минимальный период времени между операциями стыковки и расстыковки, необходимость постоянного наличия по меньшей мере одного пилотируемого корабля, пристыкованного к станции, а также различные предпочтения для стыковки различных типов судов;
- стратегический (укрупненный) план грузопотока, рассчитываемый на основе программы полетов и общего знания о потреблении с учетом необходимых технологических операций, численности космонавтов на борту станции и т. д.;
- тактический план грузопотока, который указывает конкретные даты и объемы грузов для поставок воды, топлива и продовольствия, систем, блоков и материалов для грузовых рейсов и пилотируемых космических кораблей, основанный на программе полетов;
- планы утилизации и возврата грузов на Землю, рассчитанные с учетом наличия свободного места на РС МКС и даты отстыковки и возврата кораблей.

Основная проблема и сложность планирования заключается во взаимозависимости всех этих планов и принимаемых решений, что требует смыслового согласования и точной координации действий с учетом всех перечисленных факторов.

Ввиду особенности согласованного планирования программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС система поддержки принятия решений разрабатывалась как адаптивная сеть интеллектуальных планировщиков. При этом планировщики могут конкурировать и сотрудничать, осуществлять согласованные действия и адаптироваться, объединять свои сервисы для пользователей и индивидуально выполнять различные требования. Каждое возникающее событие может повлиять на всю сеть и требует общей реакции от всех зависимых компонентов, которые учитывают как личные цели, так и ограничения каждого из членов, принимающих решение. Для обеспечения такого со-

трудничества и адаптивности принятия решений каждый планировщик разрабатывался на основе мультиагентной платформы [8], которая была применена несколько лет назад и доказала свою эффективность в области планирования грузоперевозок и производственных ресурсов.

Данный подход позволяет разрабатывать перестраиваемые и способные к реагированию системы благодаря таким биологическим механизмам, как интеллект роя и самоорганизация. Помимо способности реагировать на внезапные непредвиденные изменения разрабатываемая система должна обладать простотой в использовании и обслуживании. Предлагаемая архитектура ориентирована на модульное построение моделей разнообразного поведения агентов, их способностей и самоанализа, а также на улучшение работы агентов благодаря использованию семантики и онтологии знаний.

2. Архитектура системы, виртуальный мир, база знаний

Для повышения эффективности управления грузопотоком РС МКС разработанная сетевая мультиагентная система представляет собой адаптивную сеть, имеющую в своем составе:

- мультиагентный планировщик программы полетов;
- мультиагентный планировщик поблочного грузопотока;
- мультиагентный планировщик размещения грузов на станции;
- мультиагентный планировщик возврата грузов и их утилизации;
- мультиагентный планировщик расчета ресурсов для прогнозирования расходов топлива, воды, пищи и прочих расходуемых ресурсов на станции;
- мультиагентный планировщик расчета времени экипажа.

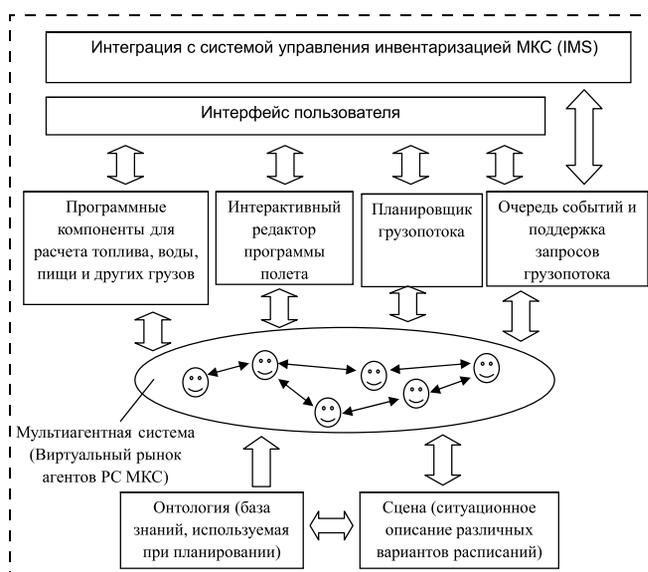


Рис. 1. Архитектура интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, планирования грузопотока и расчета ресурсов РС МКС

В архитектуре мультиагентной системы (рис. 1) каждый планировщик организован как отдельный модуль, планирование в котором осуществляется агентами, и имеет свой пользовательский интерфейс.

Виртуальный мир каждого планировщика построен на основе концепции ПВ-сети и имеет ряд специализированных агентов.

Каждый планировщик обладает агентами собственного типа. Например, в планировщике программы полетов есть Агенты космического корабля, Агенты экспедиции и Агенты космонавтов, в то время как в планировщике грузопотока есть Агенты груза и Агенты полета. Некоторые классы агентов могут существовать в двух или более виртуальных мирах, имея разную функциональность, но обеспечивая сопряжение и взаимодействие между планировщиками.

Например, Агент полета присутствует как в Планировщике программы полетов, так и в Планировщике грузопотока. Если из-за задержки подготовки корабля начало полета откладывается, агент этого полета, присутствующий в виртуальном мире программы полетов, поменяет свой план, т. е. даты запуска, стыковки и расстыковки. А так как он задействован как в программе полетов, так и в грузопотоке, то его сообщение об изменениях в плане предупредит Агентов грузов в планировщике грузопотока о задержке их полета и даст им возможность успеть "перепрыгнуть" на другой полет, если это требуется.

И наоборот, если объем некоторых грузов уменьшается, то коэффициент загрузки полета может стать слишком низким, что будет тотчас же отражено ростом неудовлетворенности Агента полета. Этот агент будет пытаться сдвинуть свой полет на более позднее время в программе полетов, чтобы стать более эффективным и привлекательным для других Агентов грузов.

Рассмотрим более подробно пример работы пользователей и взаимодействия агентов в системе. Пусть

- от куратора поступает новый запрос на доставку нового груза в определенное время — по этому событию создается новый Агент груза (потребность);
- новый Агент груза взаимодействует с Агентами полетов, которые уже имеются в системе, чтобы найти свое наилучшее размещение;
- если подходящего полета еще нет, то инициируются попытки совместно с Агентами кораблей создать новый полет или осуществить сдвиг уже имеющегося;
- если на выбранном полете достаточно свободного пространства, и данный груз уместается по массе и размерам, новый груз включается в график;
- в противном случае Агент груза пытается вытеснить один из уже размещенных ранее грузов, который имеет меньшую важность или больший резерв по времени;

- с этой целью Агент груза отправляет выбранным агентам запрос на уменьшение своих объемов и массы или перемещение в другие полеты с учетом неуменьшаемого установленного количества ресурса, которое должно быть всегда доступно на станции;
- из полученных в ответ вариантов делается попытка найти наилучшую конфигурацию, что, возможно, вызовет еще несколько взаимодействий и итераций для поиска уступок и более гармоничного решения;
- если роста ценности решения больше не наблюдается, то фиксируется "динамический останов" (система продолжает работать, но изменений плана больше не происходит), и решение выдается пользователю;
- пользователь может вручную переместить грузы на другие полеты, если необходимо, "заморозить" часть грузов от изменения размещений и т. д.

В приведенном выше примере процесса переговоров агентов может развиваться вспыхивающая "цепная реакция" перестановок, которая будет захватывать и менять принятые ранее решения, поскольку часть грузов после размещения всегда остается не полностью удовлетворенной и только и ждет возможности "перепрыгнуть" в другой корабль или перейти на другой полет при первом же случае.

Для обеспечения такого типа взаимодействий все агенты помещены на единый виртуальный рынок и связаны с одним или несколькими планировщиками принятия решений, образующими сеть адаптивных планировщиков.

Все важные знания предметной области построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС, включая описание типов агентов, предпочтений и ограничений, содержатся в онтологии, которая по сути представляет собой базу знаний планирования [9, 10]. Онтология формализует концептуальные знания предметной области и отделяет их от программного кода. Знания представлены в онтологии как семантическая сеть по-

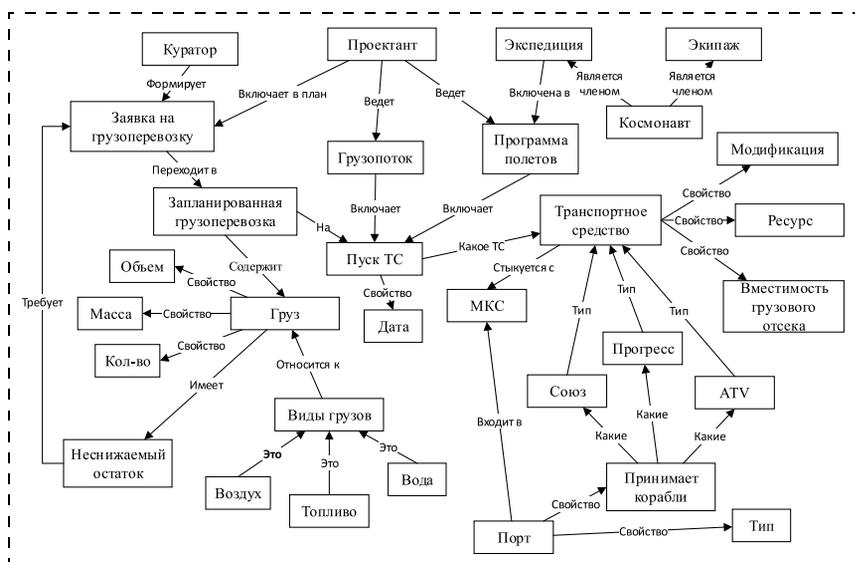


Рис. 2. Фрагмент онтологии программы полета и грузопотока

нятий о предметной области, которые определяют их атрибутами и отношениями.

Классы объектов предметной области, представленные в онтологии, включают в себя следующие: МКС, Модуль МКС, Полет, Порт, Космический корабль, Экипаж, Груз, Топливо, Программа полетов, Ресурс, Грузовой отсек, Стыковочный отсек, Служебный модуль, Исследовательский модуль, Прогресс-М, Союз и т. д. Классы основных объектов связаны отношениями внутри семантической сети, включая такие отношения, как "Состоит из" (модуль из подсистем), "Может пристыковаться к" (корабль к модулю или отсеку), "Является" классом (род—вид) и другие (рис. 2).

Онтология может быть изменена пользователями с помощью простого пользовательского интерфейса, который позволяет редактировать онтологию без отключения системы. Например, пользователи могут задать новые типы транспортных средств и указать, к каким портам они могут быть пристыкованы, а также указать новые типы портов/модулей, ввести новые виды грузов и операций и т. д.

Онтология является основой для построения концептуальных моделей сложных объектов предметной области и моделей ситуаций, представляемых как сцены мира МКС, задаваемых на вход виртуального мира мультиагентной системы планирования полетов и грузопотока МКС.

3. Интерфейс пользователя

Примеры экранов системы представлены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) и рис. 4, 5 (см. третью сторону обложки). Пользователи могут создавать различные версии программы полета и сравнивать их между собой, после чего строить под каждую версию свой план грузопотока и далее планы размещения, возврата и утилизации грузов.

Разработанные в системе версии программы полетов и грузопотока становятся доступными для согласования кураторами. В системе также обеспечивается построение различных отчетов и поддержка пользователя на основе предоставления аналитических графиков с основными показателями эффективности.

Интеграция с системой управления инвентаризацией РС МКС позволяет вносить изменения в созданный план с учетом реальных данных и инициировать перепланирование для реакции в режиме реального времени.

Заключение

Данная статья представляет реализацию интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС на основе мультиагентной платформы. Система создана по аналогии с миром живой природы, что позволяет осуществлять более быстрое принятие решений по сравнению с традиционными системами, которые основаны на иерархическом процессе принятия решений. В результате время планирования было снижено, а число анализируемых вариантов было увеличено, что привело к со-

кращению рисков при эксплуатации и жизнеобеспечении РС МКС.

С использованием данной системы были созданы программы нескольких полетов в период с 2010 по 2016 годы. Основная отличительная черта системы заключается в том, что она позволяет получить и сравнить несколько вариантов, в том числе и при моделировании возможных последствий непредвиденных событий, что очень важно в космонавтике.

Ключевым результатом внедрения системы для повышения эффективности работы предприятия является уменьшение трудоемкости и времени, затрачиваемого на планирование, и, как следствие, возможность моделирования различных вариантов расписания, а также поддержки взаимодействий и переговоров между заинтересованными участниками, направленных на поиск лучшей реакции на внешние события и адаптацию планов "на лету" в ходе работы предприятия. Эти возможности помогают свести к минимуму возможные риски и подготовиться к оперативному управлению непредвиденными событиями.

Дальнейшее развитие данной системы включает в себя улучшения мультиагентного взаимодействия для того, чтобы иметь возможность быстрее реагировать на непредвиденные события и чрезвычайные ситуации и поддерживать принятие решений в реальном времени. Для обеспечения таких возможностей планируется создание нового мультиагентного планировщика для планирования полетных операций космонавтов [11].

Разработанная система внедрена в промышленную эксплуатацию в ОАО "РКК "Энергия" и применяется для планирования программы полетов, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС.

Список литературы

1. **Wooldridge M.** An Introduction to Multi-Agent Systems. Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd, 2002. 340 p.
2. **Vos S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / Eds A. Nareyek. Berlin: Springer-Verlag, 2001. P. 1—23.
3. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity. Southampton, UK: WIT Press, 2014. 202 p.
4. **Ляхин О. И., Майоров И. В.** Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 12. С. 847—852.
5. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автоматизация. 2009. № 2. С. 78—87.
6. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177—185.
7. **Ляхин О. И.** Особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока Российского сегмента Международной космической станции // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". 2015. № 3 (47). С. 32—46.
8. **Майоров И. В.** Реализация мультиагентной платформы планирования ресурсов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 1. С. 37—41.
9. **Вакурина Т. Г., Котеля В. В., Ляхин О. И., Матюшин М. М., Скобелев П. О.** Онтология российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях // Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" — Open Semantic

Implementation of Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station

O. I. Lakhin, lakhin@smartsolutions-123.ru✉,

Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd, Samara, 443011, Russian Federation

Corresponding author: Lakhin Oleg I., Head of AeroSpace Department, Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd, Samara, 443013, Russian Federation, Ph./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru

Received on October 12, 2015

Accepted on October 20, 2015

Problem statement: In this paper the implementation of an interactive multi-agent system for flight program and cargo flow scheduling of the Russian segment of the International Space Station (ISS RS) is considered. The system solves the problem of the crew life support and ensuring proper functioning of ISS RS, as well as increasing the efficiency of decision-making by specialists of RSC "Energia" during ISS RS flight program and cargo flow schedule development and resource computation. The system provides a solution for a large number of interrelated tasks of flight scheduling (including starts, dockings and undockings) for transport and manned spacecrafts taking into account different requirements and deliveries of necessary equipment, various materials and tools onboard the ISS RS. **Methods:** The system implements a method of adaptive flight program and cargo flow scheduling for the ISS RS in real time, taking into account priorities, rules, restrictions of cargos and transport vehicles. This method is based on multi-agent technology for resolving conflicts through negotiation between agents. **Results:** The system can adapt the flight program and cargo flow schedule of the ISS RS flexibly and efficiently in response to events in real time. The developed interactive multi-agent system has been implemented in RSC "Energia" and is now in industrial operation. **Practical relevance:** The described system is used for flight program and cargo flow scheduling. The system supports coordinated work of 8 leading project engineers and more than 120 application managers working with manufacturers. A key result of the system introduction for improvement of the enterprise efficiency is reducing the complexity and time required for scheduling and, consequently, the capability for simulation of different schedule options for vehicles and cargos, as well as for support of interactions and negotiations among stakeholders, aimed at finding the best response to external events and adaptation of plans "on the fly" during the station operation.

Keywords: International Space Station, the Russian segment, adaptive scheduling, multi-agent systems, flight program, cargo flow, ontology

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation:

Lakhin O. I. Implementation of Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 42–46.

DOI: 10.17587/mau/17.42-46

References

1. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, 2002. 340 p.
2. Vos S. Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, 2001, pp. 1–23.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity, Southamp-ton, UK, WIT Press, 2014, 202 p.
4. Lakhin O. I., Majorov I. V. Metod adaptivnogo planirovaniya gruzopotoka RS MKS na osnove mul'tiagentnykh tehnologij (Method of adaptive cargo flow scheduling for the ISS RS on the basis of multi-agent technology), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 12, pp. 847–852 (in Russian).
5. Vittih V. A., Skobelev P. O. Metod sopryazhennykh vzaimodejstvij dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom mashtabe vremeni (Method of conjugated interactions for management of resource allocation in real time), *Avtometrija*, 2009, no. 2, pp. 78–87 (in Russian).
6. Vittih V. A., Skobelev P. O. Mul'tiagentnyye modeli vzaimodejstvij a dlja postroeniya setej potrebnostej i vozmozhnostej v otkrytykh sistemah (Multi-agent models of interaction for development of demand and resource networks in open systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).
7. Lakhin O. I. Osobennosti postanovki zadachi planirovaniya programmy poleta i gruzopotoka Rossijskogo segmenta Mezhdunarodnoj kos-

smicheskoy stancii (Specific features of problem statement for flight program and cargo flow scheduling for the Russian segment of the International Space Station), *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, Serija "Tehnicheskie Nauki", 2015, no. 3 (47), pp. 32–46 (in Russian).

8. Majorov I. V. Realizacija mul'tiagentnoj platformy planirovaniya resursov (Implementation of multi-agent platform for resource scheduling), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 37–41 (in Russian).

9. Vakurina T. G., Kotelja V. V., Lakhin O. I., Matjushin M. M., Skobelev P. O. Ontologija rossijskogo segmenta Mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii i ee prakticheskoe ispol'zovanie v intellektual'nyh ajerokosmicheskikh prilozhenijah (Ontology of the Russian segment of the International Space Station and its practical use in intelligent aerospace applications), *Materialy IV Mezhdunarodnoj Nauchno-Tehnicheskoy Konferencii "Otkrytye Semanticheskie Tehnologii Proektirovaniya Intellektual'nyh Sistem"* (Proc. of Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014)), February 20–22 2014, Minsk, Publishing House of BSUIR, 2014, pp. 221–226 (in Russian).

10. Vakurina T. G., Lakhin O. I., Jurygina Ju. S., Simonova E. V., Korshikov D. N., Noskova A. I. Korporativnaja raspredelennaja ontologija dlja upravlenija rossijskim segmentom mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii (Corporate distributed ontology for management of the Russian segment of the International Space Station), *Proc. of XVI Internat. conf. "Problemy upravlenija i modelirovaniya v slozhnykh sistemah"*, Samara, June 30 – July 03 2014, Samara, Publishing House of SSC RAS, 2014, pp. 435–443 (in Russian).

11. Stanilovskaja V. I., Beljaev A. M., Lakhin O. I., Noskova A. I., Ivanova D. N. Podhod k adaptivnomu planirovaniju poletnykh operacij rossijskogo segmenta mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii na osnove mul'tiagentnykh tehnologij (Approach to adaptive scheduling of flight operations of the Russian segment of the International Space Station based on multi-agent technology), *Proc. of XVII Internat. conf. "Problemy upravlenija i modelirovaniya v slozhnykh sistemah"*, Samara, June 22–25 2015, Samara, Publishing House of SSC RAS, 2015, pp. 147–157 (in Russian).