



УДК 004.822

### ОНТОЛОГИЯ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ И ЕЁ ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Вакурина Т.Г. \*, Котеля В.В. \*, Лахин О.И. \*\*, Матюшин М.М. \*, Скобелев П.О. \*\*

\* *ОАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева,  
г. Королёв, Россия*

*vlad@scsc.ru*

*tvakurina@yandex.ru*

*matushin@scsc.rus*

\*\* *ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения»  
г. Самара, Россия*

*lakhin@smartsolutions-123.ru*

*skobelev@smartsolutions-123.ru*

Рассматриваются методы и средства описания концептуальной модели международной космической станции с помощью онтологий и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях.

**Ключевые слова:** российский сегмент международной космической станции; онтология; конструктор онтологий, моделей и сцен; мультиагентные технологии; адаптивное планирование; реальное время.

#### Введение

Международная космическая станция (МКС) представляет собой уникальный, сложный, инновационный научно-технический и инженерный орбитальный комплекс большой размерности. В настоящее время в связи с усложнением конструкции МКС и устойчивым возрастанием объемов информации, требуемой для управления полетом российского сегмента международной космической станции (РС МКС) со стороны центров управления полетом (ЦУП), необходимо развитие процессов управления полетом РС МКС в рамках единой наземно-космической системы, направленной на достижение комплекса целей полета:

- обеспечение в любых ситуациях спасения жизни экипажа;
- обеспечение условий жизнедеятельности экипажа, по возможности, приближенные к земным;
- обеспечение безопасной, надежной и эффективной эксплуатации МКС;
- обеспечение реализации программ научно-прикладных исследований, проводимых на борту РС МКС;

- выработка согласованного и оптимального решения, принимаемого ответственными специалистами группы управления полетом, выраженного в планах, методиках, указаниях экипажу, управляющих воздействиях на бортовые системы и т.д.

Так, для принятия решения и согласованных действий специалистов группы управления полетом и экипажа РС МКС требуется обработка и анализ возрастающего объема информации, поступающего с борта РС МКС, например, при управлении космическим кораблем «Восток» необходимо было анализировать около 400 телеметрических параметров, а при управлении полетом РС МКС необходимо анализировать уже более 80 000 телеметрических параметров.

Для решения этих задач в 2010 году была предложена концепция мультиагентного планирования, позволяющая учитывать специфику управления полетом РС МКС и повысить эффективность собственно процесса принятия решения за счет внесения элементов самоорганизации.

Инструментом информационной поддержки принятия решений в процессах управления полетом

РС МКС и описания контекста ситуации выступают онтологией, используемые для формальной спецификации понятий и отношений, характеризующих предметную область. Такой подход позволяет справляться с растущей сложностью данной задачи и высокой динамикой изменений, возникающей как в связи с непредсказуемым появлением новых срочных потребностей в доставке грузов на борт РС МКС, переносом стартов транспортных грузовых кораблей «Прогресс» или транспортных пилотируемых кораблей «Союз», расширением номенклатуры объектов грузов, так и в процессах оперативного управления полетом РС МКС, требующих незамедлительного принятия решений в случае возникновения различных событий при парировании нештатных и аварийных ситуаций на борту РС МКС.

Все это приводит к необходимости разработки качественно новых систем принятия решений, функционирование которых будет основано на накоплении и использовании изменяющихся знаний о РС МКС.

В данной статье мы рассмотрим механизм описания концептуальной модели РС МКС, приведем ее описание на основе онтологии, а также сделаем краткий обзор систем, применяемых для принятия решений в процессе управления полетом РС МКС, использующих онтологию РС МКС.

## 1. Онтология РС МКС

Онтология позволяет строить концептуальные модели РС МКС и формировать онтологические модели ситуаций, используемых для ситуационного управления полетом РС МКС.

Применение онтологий при разработке систем, используемых для управления полетом РС МКС, позволяет формализовать специфические предметные знания в виде, допускающем компьютерную обработку, и отделить эти знания от программного кода системы. Это позволяет в более широких пределах настраивать системы на возникающие новые для них ситуации, связанные с усложнением конструкции РС МКС и процессов управления полетом РС МКС, и далее поддерживать и развивать эти системы без перепрограммирования.

Кроме того, рассматриваемые знания, описанные в онтологии РС МКС, и полученные на их основе факты могут использоваться разрабатываемыми системами для выполнении рассуждений по формированию и обоснованию планов действий и других принимаемых решений в процессе управления полетом РС МКС.

Для формализованного представления знаний наибольшее распространение на данный момент получили подходы на основе фреймов, семантических сетей, логических и продукционных правил [Гаврилова, 2000].

Каждый подход обладает своими преимуществами и недостатками, однако на текущий момент семантические сети признаны наиболее универсальными и удобными формами концептуализации знаний, поэтому для построения онтологического базиса концептуальной модели РС МКС в дальнейшем будут использоваться семантические сети.

### 1.1. Онтологический базис

Семантические сети состоят из узлов и упорядоченных отношений (связей), соединяющих эти узлы. Узлы выражают понятия или предположения, а связи описывают взаимоотношения между этими узлами.

Для представления знаний обычно используют неоднородные семантические сети [Nuhns, 1997], в которых присутствуют разные типы отношений. Различают экстенциональные и интенциональные семантические сети. Интенциональные сети задаются посредством обобщающих концептов, экстенциональные сети – посредством перечисления всех экземпляров интенциональной сети.

Развитием подхода для представления знаний стали динамические семантические сети. В предлагаемом методе предоставляется возможность строить сетевые интеллектуальные системы или сети интеллектуальных систем. В основу концепции динамической семантической сети положены следующие принципы: интеграция процедурных и декларативных знаний; параллельное функционирование всех компонентов сети; эволюция сети в реальном времени. Каждый узел динамической семантической сети является выполняемым вычислительным процессом, обладающим алгоритмами обработки информации и выработки решений, средствами общения с другими узлами сети, определенным поведением. Таким образом, каждый узел графа представляет собой выполняемый процесс, характеризуемый набором атрибутов и присоединенных функций, а структура графа отражает текущую модель предметной области.

В развитие идеи универсального базиса для представления знаний, где важной частью является созидательная деятельность людей предметной области, которая изначально рассчитана на представление процессов и действий пользователей, нами предложена концептуальная модель (мета-онтология, или модель Аристотеля) [Скобелев, 2012].

Предлагаемая базовая модель позволяет описывать не только декларативные знания о предметной области, понятия и сущности «мира», но и процедурные знания, деятельную компоненту, представляющую сценарии действий над объектами, выражающими законы мира, свойства или функции объектов, или действия субъекта над объектами мира. Кроме того, модель мира всегда предполагает наличие некоторой модели

пространства и времени, в рамках которого существуют и взаимодействуют все объекты мира, над которыми можно выполнять действия.

Предлагаемая «мета-онтология Аристотеля» является общей для всех миров, как физических, так и абстрактных и включает следующие концепты: «объекты» - сущности, характеризующиеся свойствами, «свойства», отражающие способность объектов вступать во взаимодействия, «процессы» - цепочки действий по изменению состояний объектов, «отношения», позволяющие связывать объекты и конструировать сложные объекты из простых и «атрибуты», характеризующие состояния концептов. Мета-онтология Аристотеля предполагает следующие важные свойства:

- существуют объекты, которые обладают свойствами и характеризуются состояниями;
- с каждым объектом можно что-то делать, изменяя состояние, свойства или отношения между объектами;
- отношения между объектами могут отражать структурные, функциональные, временные или любые другие виды связей;
- чтобы выполнить действие над объектом, необходимо соблюдение определенных условий, которые задаются свойствами и отношениями;
- сложные объекты строятся из простых объектов путем выполнения действий (процессов) над ними для установления отношений и связывания простых объектов в сложные;
- свойства выражают способность объектов вступать в процессы взаимодействия на основе законов мира;
- события, действия (процессы) изменяют состояния объектов, их свойства и отношения и запускают новые процессы;
- процессы состоят из действий с объектами, так же как сложные объекты состоят из простых;
- с каждым объектом мира можно что-то делать в любой момент времени (нет тупиковых состояний), но чтобы выполнить действие над объектом необходимо выполнить определенные условия;
- объекты, свойства, отношения, процессы (действия) характеризуются атрибутами различных типов, которые имеют диапазоны значений и конкретные значения в заданный момент времени;
- атрибуты объекта/отношения являются качественной или количественной характеристикой понятия;
- правила являются обобщенными понятиями для формализованных условий вида «если-то» (предикатов) и высказываний (утверждений, аксиом, фактов).

Предлагаемая нами «мета-онтология

Аристотеля» позволяет описать концептуальную модель РС МКС.

## 1.2. Концептуальная модель РС МКС

На основе предлагаемого нами онтологического базиса можно описать концептуальную модель РС МКС, при этом описываются все возможные конфигурации РС МКС с состояниями объектов в заданный момент времени, что может давать для любой системы полный контекст состояния станции и складывающейся ситуации управления полетом РС МКС экипажем и специалистами оперативной смены ЦУП.

В качестве примера приведем некоторые понятия, представляющие концептуальную модель РС МКС:

- классы понятий: «РС МКС», «ТГК «Прогресс», «ТПК «Союз», «Модуль», «Отсек», «Стыковочный узел», «Люк», «Бортовое оборудование» (Пульты, Датчики, Клапаны и т.п.), «Бортовое средство» (Баллон наддува переносной, Секции грузового корабля, Мановакуумметр и т.п.), «ТМИ», «Экипаж», «Специалист ЦУП»;
- свойства: Отсек «имеет» Объем, Отсек «имеет» Длину, Объект «имеет» Горючесть, Средство наддува «имеет» Давление, Космонавт «имеет» Дееспособность, Люк «имеет» Текущее положение;
- процессы: «Падение давления» в отсеке, «Перемещение» космонавта, «Открытие» баллона наддува, «Потребление кислорода» космонавтом, «Включение» устройства, «Открытие» люка;
- отношения: СОЮЗ «пристыкован к» МИМ2, Космонавт «держит» Огнетушитель, Средство наддува «находится в» отсеке, Экипаж «использует» Средство наддува, Модуль «стыкуется» с Модулем;
- атрибуты: «Текущее давление», «Темп падения давления», «Резервное время», «Текущая масса».

Эти базовые понятия и отношения, представляющие собой семантическую сеть, вместе с встроенными сценариями и правилами их интерпретации определяют метаонтологию РС МКС. Используя указанные концепты метаонтологии можно сконструировать модель деятельности по управлению полетом РС МКС. Например, подключение к двум объектам, связанным отношением «контакта», свойств «иметь электрическую проводимость» и «иметь горючесть» позволяет активировать законы электричества и при определенных условиях проводник в концептуальной модели цепи, через который идет ток, может нагреться, а у рядом находящегося объекта со свойством «имеет горючесть» при достижении некоторой температуры может запуститься процесс возгорания.

Рассмотрим использование онтологии РС МКС на примере развития на борту РС МКС аварийной ситуации «Пожар».

1. Для объектов РС МКС вводится свойство «Может гореть», которому задаются параметры (температура загорания, теплоемкость и др.).

2. Свойство «Может гореть» связывается с процессом «Пожар», в котором пересчитывается температура соседних объектов.

3. При возникновении пожара автоматически запускается процесс «Пожар», в котором агент пожара находит ближайшие объекты в модуле и проверяет их на наличие свойства «Может гореть». Если температура выше заданной (загорания), происходит возгорание этих объектов и создаются новые агенты этих горящих объектов, которые сторают за время, обусловленное их теплоемкостью.

4. Объект «огнетушитель», в режиме использования создает пенную массу, которая противостоит горению и останавливает горение при определенных параметрах;

5. В случае отсутствия кислорода, горючих объектов или при использовании средств тушения пожар завершается.

6. Напротив, от горящих объектов возгораются другие – пожар рекурсивно (вне зависимости от числа агентов, но в зависимости от конфигурации – концептуальной модели РС МКС) распространяется в заданном объеме, поднимая температуру, выжигая кислород и т.д.

Таким образом, с использованием онтологии можно специфицировать конкретные факты и строить модели описания ситуаций для работы агентов. В создаваемой концептуальной модели РС МКС «все связано со всем» и любой объект может запускать процессы, с ним связанные, которые меняют свойства или устанавливают отношения с другими объектами и т.д. В результате могут инициироваться такие процессы, как пожар, и уже на этой основе одновременно развиваются процессы планирования возникающей аварийной ситуации, которые могут быть легко визуализированы, использованы для прогнозирования развития ситуации и т.д.

### 1.3. Использование онтологии РС МКС в процессе принятия решений

При проектировании онтологии РС МКС все необходимые нам знания мы можем разделить на [Абрамов, 2005]:

- знания предметной области;
- знания, относящиеся к методу решения задачи или принятия решений.

Таки образом, онтология РС МКС представляет набор двух миров:

- мир первого рода – мир предметной

области, в какой-то мере внешнего по отношению к системе и определяющего объекты реального мира, которыми мы оперируем при принятии решения. Это пассивный мир природных и искусственных объектов РС МКС, который не «думает» и не «строит планы» по ситуации, и который характеризуется свойствами и физическими законами. Процессы, моделирующие физические законы, работают как «автоматы», создавая новые объекты, устанавливая отношения между ними, изменяя значения атрибутов, запуская новые процессы при возникновении необходимых ситуаций (событий). Приведенный в предыдущем разделе пример развития пожара описывает процессы пассивных объектов мира первого рода.

- мир второго рода – мир активных объектов, в котором отражены знания о том, каким именно образом мы принимаем решения. Это мир акторов (людей) и агентов (программ) – особый подкласс объектов, наделенных как свойствами, описанными выше, которым пассивно следует (человек так же, как огнетушитель, имеет свойство «вес» и вступает в процессы мира первого рода, связанные со свойством «вес»), так и целенаправленным поведением, способностью создавать сценарии (планы) и действовать исходя из собственных предпочтений и ограничений.

Два этих мира (физических объектов, подчиненных физическим законам, и людей или агентов, обладающих активным поведением) строятся на взаимодействиях: акторами или агентами можно «населить» любой мир первого рода, и тогда активное поведение агентов, будет влиять на изменение свойств объектов, и наоборот, объектами можно наполнить мир людей, тогда возникновение любых событий или явлений мира первого рода, будет вызывать активацию и ответную реакцию агентов.

При этом одним из достоинств такого построения является то, что для одних и тех же знаний предметной области мы можем применять различные знания о методе решения, изменяя тем самым поведение системы.

Ключевыми понятиями онтологии принятия решений являются: «цели», «критерии принятия решений», «предпочтения», «объекты» и «субъекты» деятельности, «сценарии действий», «стратегии», «результаты действий». В онтологии РС МКС мы можем определять конкретные цели, стоящие перед нами, декларировать возможные пути их достижения, критерии, которыми мы руководствуемся при принятии решения, взаимосвязи между различными понятиями. При этом определенные критерии будут связаны с целью, выражая тем самым то, что успешность достижения цели определяется данными критериями и т.п. Отметим, что в онтологии не задается четкий алгоритм решения поставленных задач, а определяются возможные пути получения

решения с указанием свойственных каждой альтернативе компромиссов.

Система поддержки принятия решения проектируется способной понимать и рассуждать в рамках описанной модели, другими словами, она, опираясь на знания, описанные в онтологии, осуществляет поиск решений в соответствии с нашими целями и предпочтениями, находя определенный баланс между различными компромиссами, такими, как например, резервное время, скорость падения давления или распространения пожара, риск и т.п.

## 2. Конструктор онтологий

Для создания онтологии РС МКС предлагается использовать конструктор онтологий (конструктор виртуальных миров) и набор сопутствующих инструментов, в рамках которого пользователь может построить модель предметной области и концептуальную модель РС МКС, описать исходную ситуацию, создать вручную или автоматически сценарий действий или рассуждений и исполнить его по шагам, моделируя поведение агентов для достижения результатов.

Конструктор онтологий представляет собой комплекс инструментальных средств для управления онтологиями, моделями, сценами и агентами, предназначен для создания интеллектуальных систем управления ресурсами на основе мультиагентных технологий.

В Конструкторе онтологий для удобства построения различных элементов концептуальной модели выделяются три уровня описания предметной области: «онтология» - «модель» - «ситуация (сцена)»:

- Онтология описывает понятия и отношения (подобно толковому словарю), необходимые для описания знаний в любой предметной области (аэрокосмические организации, биотехнологии, медицина, наносистемы, живые системы и т.д.); на основе онтологии в дальнейшем строится модель деятельности.

- Модель описывает устойчивые конфигурации объектов, упрощающие создание формализованных описаний сцен в конкретных ситуациях (например, не следует каждый раз описывать конфигурацию международной космической станции, достаточно сохранять эти сведения в модели для дальнейшего использования).

- Ситуация (сцена) описывает экземпляры понятий и отношений в заданный момент времени (набор фактов); сцена подобна мгновенной «фотографии» ситуации в заданный момент времени.

Конструктор онтологий предоставляет следующие основные функциональные возможности для работы с онтологией, моделью и сценой:

- проектирование онтологии в виде семантических сетей. Используя конструктор онтологий, разработчик и пользователь может создавать и редактировать онтологии, специфицируя свои концепты (классы) и устанавливая связи между ними.

- возможность описания сценариев действий помимо описания декларативной части;

- при выборе любого понятия в дереве понятий или на семантической сети получение его параметров и всех связей, добавление нового свойства или установление нового отношения;

- при выборе объекта пользователем получение всего списка действий над ним и атрибутов; при выборе некоторого действия получение всего списка объектов, над которым оно может выполняться, и набора атрибутов, которые действие может менять;

- задание в дескрипторе сценария действия цели, кто именно может являться субъектом действия, какие знания и инструменты применяются при его реализации, каковы условия этого применения и результаты действия;

- создание сцены, набора экземпляров классов и отношений, описывающих некоторую ситуацию в мире и работа с ними. Каждый из экземпляров набора связан с некоторым концептом онтологии отношением вид-род;

- осуществление навигации по семантическим сетям онтологий и сцен (получение связанных сущностей, проверка наличия пути и т.д.). При этом функции по навигации доступны как разработчикам с помощью программного интерфейса приложения (API), так и в методах концептов.

- хранение онтологии и сцены в реляционной базе данных, либо в XML хранилище, импорт/экспорт онтологий в XML.

Возможности такого конструктора онтологий позволяют описывать предметную область не только программисту или инженеру по знаниям, но и любому рядовому пользователю, не являющемуся профессиональным программистом.

## 3. Примеры применения онтологии РС МКС

Концептуальная модель РС МКС, построенная с помощью конструктора онтологий и постоянно развивающаяся, на данный момент используется в РКК «Энергия» в следующих интеллектуальных системах поддержки принятия решений при управлении полетом РС МКС:

- интерактивная мультиагентная система построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов МКС [Диязитдинова, 2011].

- интеллектуальная система поддержки принятия решений при использовании бортовых ресурсов в процессе парирования аварийных ситуаций [Матюшин, 2013];

- автоматизированная система поддержки принятия решений при организации работы оперативной смены Главной Оперативной Группы Управления (ГОГУ).

Онтология РС МКС на данный момент состоит из более чем 3000 объектов, отношений, атрибутов, свойств и процессов.

Специалистами «НПК «Разумные решения» совместно со специалистами РКК «Энергия» планируется дальнейшее развитие онтологии РС МКС и ее использование в новых интеллектуальных аэрокосмических приложениях, которые подробно будут представлены в следующих статьях: адаптивный тренажер для формирования и восстановления навыков ситуационной поддержки принятия решений специалистами ГОГУ; интеллектуальная автоматизированная система предупреждения нештатных ситуаций в бортовых системах ТГК «Прогресс»; мультиагентная система планирования ресурсов комплекса целевых нагрузок РС МКС; мультиагентная система формирования и выполнения программ научно-прикладных исследований на РС МКС и целый ряд других систем, решающих различные задачи поддержки принятия решений и поддержки коммуникативного взаимодействия различных специалистов при управлении полетом РС МКС.

Знания, используемые во всех приведенных интеллектуальных аэрокосмических приложениях, хранятся в виде онтологии РС МКС, созданной с помощью конструктора онтологий, позволяющего описывать предметную область, ограничения, существующие в реальном мире, а также бизнес-логику принятия решений.

## Заключение

В работе кратко описана проблема и актуальность решения поставленных задач по оперативному управлению полетом РС МКС. Предложен подход к созданию концептуальной модели (онтологии) РС МКС и ее использования для ситуационного управления полетом РС МКС в реальном времени.

Представлен пример построения концептуальной модели РС МКС и возможностей ее использования для принятия решений. Описаны основные возможности конструктора онтологий для построения онтологии РС МКС. Кратко представлены системы поддержки принятия решения при управлении полетом РС МКС, в которых используется онтология РС МКС.

Сравнительный анализ ошибок, допущенных специалистами управления полетом РС МКС и станции «Мир», показывает, что комплекс мер, в

том числе, и мер, предлагаемых системами поддержки принятия решений при управлении полетом, позволил с началом эксплуатации РС МКС свести до минимума влияние различных факторов при управлении полетом РС МКС и повысил безошибочность работы специалистов оперативного управления полетом РС МКС.

## Библиографический список

[Гаврилова, 2000] Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский // СПб. - 2000. - 384 с.

[Huhns, 1997] Huhns, M.N. Ontologies for Agents / M.N. Huhns, M.P. Singh // IEEE Internet Computing - 1997. - November - December. - P. 17-24.

[Скобелев, 2012] Скобелев, П.О. Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятием в реальном времени / П.О. Скобелев // Онтология проектирования, 2012, №1(3), С. 26–48.

[Абрамов, 2005] Абрамов, Д.В. Разработка средств построения и использования онтологий для поддержки процессов принятия решений / Д.В. Абрамов, В.В. Андреев, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев // Труды VII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СНЦ РАН. - 2005. - с. 435 - 440.

[Дязитдинова, 2011] Дязитдинова, А.Р. Обеспечение согласованного взаимодействия по планированию грузопотока Международной космической станции с помощью мультиагентных технологий / А.Р. Дязитдинова, А.В. Иващенко, И.И. Литвинов, А.Л. Новиков, П.О. Скобелев, М.В. Сычева, И.И. Хамиц // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара: СНЦ РАН, 2011, С. 435–442.

[Матюшин, 2013] Матюшин, М.М. Автоматизированная система поддержки принятия решений в аварийных ситуациях / М.М. Матюшин, С.И. Потоцкий, П.О. Скобелев, В.И. Потапов, О.И. Лахин // Программные продукты и системы, 2013, №3. С. 62–69.

## ONTOLOGY OF ISS RUSSIAN SEGMENT AND ITS PRACTICAL USE IN INTELLECTUAL AEROSPACE APPLICATIONS

Vakurina T. \*, Kotelya V. \*, Lakhin O. \*\*,  
Matushin M. \*, Skobelev P. \*\*

\* *S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev, Russian Federation*  
*vlad@scsc.ru*  
*tvakurina@yandex.ru*  
*matushin@scsc.rus*

\*\* *Software Engineering Company Smart Solutions, Samara, Russian Federation*  
*lakhin@smartsolutions-123.ru*  
*skobelev@smartsolutions-123.ru*

Methods and tools for describing International Space Station conceptual model by means of ontologies and their practical use in intellectual aerospace applications for situational flight management of ISS Russian segment in real-time are considered in this paper.