

# Машиностроение и машиноведение

УДК 621.004.896

doi: 10.18698/0536-1044-2020-12-3-15

## Предназначение и задачи робототехнических систем в российской лунной программе

Е.А. Дудоров<sup>1,2</sup>, И.Г. Сохин<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им Г.И. Носова<sup>2</sup> АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника»

## The Purpose and Tasks of Robotic Systems in the Russian Lunar Program

E.A. Dudorov<sup>1,2</sup>, I.G. Sokhin<sup>2</sup><sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University<sup>2</sup> AO Research and Production Association Android Technics

Задачи освоения Луны и других планет Солнечной системы предполагают широкое использование робототехнических систем различных типов и назначения. Однако в настоящее время отсутствует общепринятая система взглядов на выбор области эффективного применения робототехнических систем для решения задач космической деятельности. На основании предложенного подхода к выбору приоритетных робототехнических систем рассмотрены возможные области их перспективного использования для обеспечения российской лунной программы. Также исследованы такие вопросы, как многокритериальная классификация робототехнических систем космического назначения, особенности удаленного управления роботами, направления работ по созданию российских робототехнических систем для лунной программы. Изучены вопросы необходимости, возможности и обоснованности выполнения полетных операций с помощью робототехнических систем космического назначения. Рассмотрены задачи роботов при освоении Луны, которые разделены на четыре фазы: инфраструктурную, обеспечивающую, эксплуатационную и исследовательскую. Описаны ключевые технологии космической робототехники (электроника, механика, программное обеспечение, управление) и смежные технологии на их стыке. Приведены три основных направления Роскосмоса по созданию технологических, антропоморфных и грузовых роботов. Сделаны выводы о реализации планов по освоению и использованию Луны.

**Ключевые слова:** антропоморфная робототехническая система, дистанционное управление, копирующие манипуляторы, лунная инфраструктура, лунная программа, полетная операция

The exploration of the Moon and other planets of the Solar system involves a widespread use of robotic systems of various types and purposes. However, currently there is no generally accepted frame of reference for the effective application of different robotic systems for performing space exploration tasks. Based on the approach to the selection of priority robotic systems proposed by the authors, possible areas of their advanced application to support the implementation of the Russian lunar program are considered in this paper. Multi-criteria classification of space-based robotic systems, features of remote control of robots,

and directions of work on the development of Russian robotic systems for the lunar program are also examined. The questions of necessity, possibility and validity of flight operations using space-based robotic systems are explored. The tasks of robots in the exploration of the Moon, which are divided into four phases: infrastructure, provision, operation and research, are considered. Key technologies of space robotics (electronics, mechanics, software, control), as well as related technologies at their intersection are presented. Three main areas of Roscosmos' work on the development of technological, anthropomorphic and freight robots are presented. Conclusions on the implementation of plans for the exploration and use of the Moon are drawn.

**Keywords:** anthropomorphic robotic system, remote control, copying manipulators, lunar infrastructure, lunar program, flight operation

**Робототехнические системы (РТС) космического назначения (КН).** Процесс проникновения человека в космос состоит из трех основных стадий: исследования, освоения и использования. В настоящее время актуальным становится переход от стадии исследования космического пространства к его освоению и промышленному использованию.

В настоящее время пилотируемая космонавтика переживает переломный период почти во всех экономически развитых странах. Низкие околоземные орбиты за сорокалетний период эксплуатации орбитальных пилотируемых станций как универсальных исследовательских платформ стали областью в значительной мере освоенной, вполне готовой к использованию.

Существенная часть исследований в околоземном пространстве уже завершена либо носит выраженный прикладной характер. Новые направления пилотируемой космической деятельности находятся в более удаленном пространстве, чем низкие околоземные орбиты. Возможными объектами дальнейшего исследования и освоения являются Луна, астероиды, Марс и другие планеты Солнечной системы.

Анализ планов ведущих космических агентств позволяет сделать вывод, что проекты по освоению и промышленному использованию Луны станут основным направлением развития космонавтики в XXI веке. Несмотря на то, что стратегическим направлением развития космонавтики обычно называют реализацию пилотируемой экспедиции на Марс, Луна станет необходимым этапом в подготовке такой экспедиции. В процессе исследований на Луне будет выяснен фундаментальный вопрос о принципиальной возможности существования внеземных колоний человеческой цивилизации [1].

Цель работы — сформировать четкое представление о предназначении РТС КН, разработа-

тываемых и планируемых к применению при освоении Луны.

Согласно планам Роскосмоса, на первом этапе лунной программы (ЛП) будут применены автоматические космические аппараты «Луна-25», «Луна-26» и «Луна-27», а также «Луна-Грунт». Их задачами будут исследования районов посадки, отработка технологий и создание инфраструктуры лунного полигона для обеспечения второго пилотируемого этапа ЛП. Планы первого и второго этапов ЛП России разработаны с учетом преемственности, что позволяет в процессе реализации создавать и испытывать более сложные системы и технологии, в частности, РТС.

Посадки всех космических аппаратов (пилотируемых и автоматических) на Луну будут проводиться в заранее подготовленный район лунного полигона в окрестности Южного полюса, который должен иметь благоприятные природные условия освещенности и полезные лунные ресурсы. В этом районе будет размещена российская космическая инфраструктура, включающая в себя бытовой модуль с радиационной защитой, систему энергоснабжения, мобильные средства и научно-исследовательский комплекс.

В дальнейшем лунный полигон будет постепенно расширяться, превращаясь в российскую посещаемую лунную базу. Национальное аэрокосмическое агентство США предлагает странам-участникам Международной космической станции (МКС) принять участие в работах по созданию окололунной пилотируемой станции Lunar Orbital Platform-Gateway, которая должна стать космическим портом и расширить возможности присутствия человека в дальнем космосе.

При переходе к освоению и промышленному использованию Луны предполагается широкое использование РТС КН с целью снижения за-

трат и рисков для человека. Ожидается, что в качестве средств роботизированной поддержки будут использованы различные по назначению, функциональности и конструктивным особенностям типы роботов. К ним, в частности, относятся транспортные и грузовые манипуляторы, сервисные манипуляторы технического обслуживания и ремонта (ТОР), напланетные роверы и промышленные роботы для переработки полезных ископаемых и антропоморфные роботы.

Однако в настоящее время отсутствуют достаточно обоснованные решения по выбору областей эффективного применения разных типов РТС КН для решения задач космической деятельности. Это связано с тем, что объективно оценить эффективность РТС КН можно на основе формирования целостной системы критериев, показателей, выявления и оценки множества факторов эффективности выполнения полетных операций (ПО) с помощью РТС.

Проблема заключается в отсутствии фактических данных об эффективности применения РТС КН разного типа. Четкие границы областей применения роботов априорно определить достаточно сложно. Предпочтительнее искать не области, а направления и, возможно, точки наиболее целесообразного применения роботов исходя из имеющихся и прогнозируемых возможностей.

Поэтому на начальном этапе исследований при выборе предпочтительных типов РТС КН для выполнения тех или иных задач (ПО) предлагается использовать упрощенную систему критериев и показателей необходимости и возможности (реализуемости) ПО с помощью РТС КН [2]. Предполагается, что предпочтительный тип РТС и режим ее использования для роботизации ПО должен располагаться в области пересечения указанных критериев (рис. 1).



Рис. 1. Двухфакторная схема выбора предпочтительного типа РТС КН

Указанное логическое условие служит тем грубым логическим фильтром, через который следует пропустить роботизируемые ПО и функциональные возможности тех или иных РТС. Более тонким логическим фильтром являются частные факторы условий применения, влияющие на эффективность РТС. Отсутствие или наличие частных факторов будет влиять на расширение или сужение области возможности и необходимости выполнения роботизированных ПО автономно РТС или с ее помощью при участии экипажа. Например, в случае высокой неопределенности задачи и неспособности ее проведения в автоматическом режиме может быть принято решение об управлении РТС в копирующем режиме человеком-оператором.

*Необходимость роботизации работ* может быть вызвана следующими факторами:

- срочностью выполнения ПО (срочным инспектированием при выходе через технологический отсек без десатурации, например, при разгерметизации);
- признаками, свидетельствующими о наличии опасности для космонавта (повышенной радиацией, нейтронным излучением, солнечными вспышками, распылением вредных веществ и др.);
- острой необходимостью разгрузки космонавтов от ряда ПО и оказания помощи экипажу;
- рутинностью многократного повторения однотипных простых операций, их цикличностью (например, при проведении бортовых экспериментов, которые при многократном выполнении приводят к утомляемости и ошибкам исполнителя);
- очевидной продуктивностью РТС при определенных условиях работы — оперативном выходе в открытый космос, самостоятельном выборе рационального маршрута передвижения, безошибочном проведении большого количества однотипных действий и др.;
- результативностью выполнения простых и программируемых операций посредством РТС;
- необходимостью высвобождения космонавта для проведения других срочных работ;
- физиологическими и техническими ограничениями в работе космонавтов (такими как усталость, ограниченное время работы в выходном скафандре, недостаточные физические усилия).

*Возможность выполнения ПО с помощью РТС* зависит от следующих факторов:

- степени детерминированности ПО;



Рис. 2. Трехфакторная схема выбора предпочтительного типа РТС КН

- уровня функциональности РТС;
- способности РТС к навигации и перемещению;
  - технических характеристик системы (скорости и точности выполнения операций, массы и габаритных размеров перемещаемого оборудования и др.);
  - физических усилий, которые способна развивать РТС;
  - наличия в составе РТС соответствующего инструмента;
  - отсутствия ограничений по применению РТС и т. п.

Композиция показателей (оценок) частных факторов позволит выделить предпочтительные кластеры ПО для роботизации, а также определить предпочтительный тип и режим (автоматический, копирующий, супервизорный) используемой РТС КН. Однако для уточнения критериев выбора в схеме (см. рис. 1) следует ввести еще один показатель — экономическую обоснованность, тогда мы получим график, приведенный на рис. 2.

*Экономическая обоснованность выполнения ПО с помощью РТС* зависит от следующих факторов:

- обеспечение доступа к ресурсам других космических объектов;
- снижение стоимости фундаментальных исследований в космосе при применении РТС;
- создание высокотехнологичного оборудования в условиях космоса.

**Задачи РТС КН в планах освоения и использования Луны.** Задачи и условия применения РТС КН в ЛП определяются объективной необ-

ходимостью роботизации ряда операций при создании и применении лунной инфраструктуры (ЛИ). Рассмотрим подход реализации российской ЛП.

В качестве исходных данных для определения задач РТС КН использованы базовые положения, лежащие в основе современной концепции создания и эксплуатации ЛИ [3–8], которая делится на четыре фазы.

**Инфраструктурная фаза.** К началу пилотируемой фазы ЛП на Луне должна быть построена космическая инфраструктура, обеспечивающая безопасное пребывание космонавтов экспедиций посещения. Поэтому все операции по созданию постоянно действующей ЛИ до прибытия на Луну первого экипажа должны быть роботизированы.

Лунная инфраструктура должна сделать возможным совершение перелетов пилотируемых и грузовых кораблей по маршрутам Земля–Луна–Земля, обеспечить устойчивые каналы связи, способствовать разведке, добыче и переработке полезных ископаемых на лунной поверхности, а также создать условия для проведения научно-прикладных исследований и экспериментов. Для этого ЛИ должна включать в себя лунную орбитальную станцию (ЛОС) как средство-шлюз для транспортно-технических операций между Землей и поверхностью Луны и научно-технологическую базу на лунной поверхности — лунную базу (ЛБ).

На начальном этапе ЛП создание ЛИ обеспечивается автоматическими космическими аппаратами и телеуправляемыми РТС КН. После такого сужения области выбора предпочтительного типа РТС КН экономическая обоснованность зависит от следующих факторов: приоритет государства; космическая гонка; промышленный интерес и др.

**Обеспечивающая фаза.** ЛОС и ЛБ будут посещаемыми. Постоянное присутствие экипажа на них не предусмотрено, предполагается только периодическое присутствие человека на Луне во время кратковременных экспедиций посещения. Поэтому операции по эксплуатации ЛОС и ЛБ на беспилотной фазе будут выполнять постоянно находящиеся на них РТС КН и наземный центр управления полетами (ЦУП) дистанционно.

При этом РТС должны обеспечивать работоспособность при функционировании как в гермоотсеках, так и в открытом космическом пространстве. На пилотируемых участках поле-

та ввиду их краткосрочности экипажам требуется активная роботизированная поддержка роботов различного типа.

**Эксплуатационная фаза.** В отсутствие экипажа ТОР бортовых систем ЛОС и функциональное резервирование в нештатных ситуациях (которое на околоземных орбитальных станциях осуществлял экипаж) должно быть возложено на РТС КН. При этом рутинные операции ТОР могут выполнять автономные мобильные манипуляторы, функционирующие в автоматическом режиме.

Некоторые операции ТОР, требующие особо тонких манипуляций, будут выполнять автономные мобильные антропоморфные робототехнические системы (АРТС), работающие в автоматическом режиме. Также мобильные АРТС можно применять в качестве функционального резерва в нештатных ситуациях, заменяя отсутствующий экипаж.

К таким ситуациям относятся: инспектирование аварийных объектов, локализация источников возгорания или мест разгерметизации, ручной переход на резервный режим бортовой системы в случае возникновения нештатной ситуации и невозможности выдачи команды из ЦУП по командной радиолинии, ручная реконфигурация системы и т. п.

Для выполнения таких задач АРТС должны обладать широким функционалом поведенческих возможностей с элементами искусственного интеллекта (ИИ). В сложных нештатных ситуациях с высокой степенью неопределенности, требующих «сильного» человеческого интеллекта, могут быть применены АРТС, телеуправляемые оператором из наземного ЦУП в копирующем режиме.

**Исследовательская фаза.** На лунной базе также предполагается задействовать РТС КН разного типа. Внутри герметичных модулей их использование аналогично таковому на ЛОС. Для рутинных операций ТОР бортовых систем и научного оборудования будут применены автономные роботы-манипуляторы. Для особо тонких операций ТОР и обеспечения функционального резервирования при возникновении нештатных ситуаций будут задействованы АРТС, управляемые в автоматическом или удаленном (с участием человека-оператора) режиме управления.

Для работы на внешней поверхности Луны (вне гермоотсеков) найдут применение различные транспортные и технологические роботы-

манипуляторы, в том числе мобильные АРТС на подвижной платформе. Последние будут использованы для выполнения особо тонких операций инспектирования, исследований и ТОР.

Таким образом, независимо от выбранных сценариев пилотируемого освоения Луны, для создания и эксплуатации ЛИ должны быть решены следующие задачи РТС КН [9]:

- создание и поддержание работоспособности ЛИ (ЛОС, ЛБ);
- организация ЛИ (разведка, добыча, переработка и использование лунных ресурсов для обеспечения объектов лунной базы, строительно-монтажные операции, транспортно-логистические операции);
- инспектирование состояния элементов ЛОС, ЛБ и их бортовых систем (включая выполнение операций в открытом космосе);
- ТОР бортовых систем и научной аппаратуры (включая проведение операций в открытом космосе);
- разгрузка грузовых кораблей, пристыковавшихся к ЛОС;
- ликвидация последствий нештатных и аварийных ситуаций, которые нельзя устранить средствами бортовой автоматики и наземным ЦУП (включая выполнение операций в открытом космосе);
- обеспечение операционной поддержки деятельности космонавтов в условиях орбитального полета и на поверхности Луны;
- самостоятельное (автономное) выполнение рутинных ПО внутрикорабельной деятельности (ВнуКД) по обслуживанию элементов ЛИ (орбитальных станций, лунной базы);
- самостоятельное (возможно, в копирующем режиме) проведение ПО внекорабельной деятельности (ВнеКД) по обслуживанию элементов ЛИ;
- самостоятельное (возможно, в копирующем режиме) выполнение операций по сборке конструкций на орбите и на поверхности Луны;
- ассистентная помощь космонавтам при осуществлении операций ВнуКД и ВнеКД (функция дополнительных рук, информационная поддержка);
- инспектирование аварийных и опасных объектов, выполнение особо опасных операций ВнуКД и ВнеКД (возможно, в копирующем режиме);
- психологическая и информационная поддержка космонавтов в длительном космическом полете.

**Классификация РТС КН.** В настоящее время существует несколько отраслевых стандартов по робототехнике [10–14], но в них отсутствует общепринятая классификация РТС КН. Это обстоятельство препятствует обоснованному выбору типа и технического облика РТС для решения тех или иных конкретных задач космической деятельности. Предлагается следующая многокритериальная классификация РТС КН применительно к задачам освоения и использования Луны [9].

**По назначению** РТС КН подразделяют на роботов, выполняющих следующие функции:

- ТОР служебных систем и научной аппаратуры;
- ассистентную операционную поддержку деятельности космонавтов;
- инспектирование аварийных и опасных объектов;
- обнаружение и ликвидацию последствий нештатных и аварийных ситуаций;
- разгрузку грузовых кораблей, пристыковавшихся к ЛОС;
- перенос грузов на внешней поверхности орбитальных (межпланетных) космических аппаратов;
- транспортирование грузов на поверхности планет;
- сборку конструкций на орбите и поверхности Луны;
- добычу, переработку лунных ресурсов и их промышленное использование (например, применение аддитивных технологий 3D-печати для изготовления строительных материалов лунной базы, обеспечение ЛБ водой, синтезированным ракетным топливом);
- информационную поддержку деятельности космонавтов (информационно-справочные и советующие экспертные системы);
- психологическую поддержку космонавтов в длительном космическом полете.

**По условиям применения (влиянию факторов окружающей среды)** РТС КН подразделяют на четыре класса роботов, работающих:

- внутри гермоотсеков орбитальных (межпланетных) космических аппаратов;
- в открытом космосе на внешней поверхности орбитальных (межпланетных) космических аппаратов;
- внутри гермоотсеков напланетных баз;
- в открытом космосе на поверхности планет.

**По мобильности** РТС КН подразделяют на два класса:

- мобильные роботы — роботы с автономным управлением, способные самостоятельно передвигаться [7];

- стационарные роботы — роботы, устанавливаемые (фиксируемые) в определенной рабочей зоне и лишенные способности самостоятельно перемещаться в пространстве или по поверхности с помощью собственных элементов конструкции; перемещение этих роботов может быть обеспечено комплексированием с другими типами мобильных роботов (например, их размещением на вереве).

**По функциональности** РТС КН подразделяют на три класса:

- универсальные — роботы, способные без существенных доработок осуществлять большинство операций, которые выполняет космонавт;
- задачно-ориентированные — роботы, приспособленные для проведения операций определенного круга задач (например, задач ТОР, разгрузки, транспортирования и переноса грузов);
- узкоспециализированные — роботы, способные выполнять одну или несколько типовых операций (например, робот-пылесос).

**По интеллектуальности (наличию элементов ИИ)** РТС КН подразделяют на роботов, обладающих следующими свойствами:

- восприятием среды (сенсорная система очувствления);
- адаптивностью поведения в недетерминированной среде;
- взаимодействием с людьми и другими роботами (коллаборативностью).
- программируемостью (обучением).

**По автономности** выделяют следующие классы РТС КН:

- автономные — роботы, способные выполнять задачи по предназначению (основываясь на текущем состоянии изделия и особенностях считывания данных без вмешательства человека) и подразделяемые по степени интеллектуальности на две группы [14]:

- программные — автоматические роботы, работающие по жесткой программе в строго определенной обстановке;

- интеллектуальные адаптивные — автоматические роботы с элементами ИИ, которые могут самостоятельно действовать в неопределенной или изменяющейся обстановке;

- дистанционно управляемые (телеуправляемые) — роботы, управляемые человеком-

оператором, подразделяемые по способам удаленного управления ими:

– роботы с командным управлением; приводы каждого сустава манипулятора человек-оператор включает по отдельности дистанционно путем нажатия на соответствующие кнопки или тумблеры; в командном режиме можно выполнять обучение (программирование) роботов;

– копирующие роботы, управляемые человеком-оператором дистанционно с помощью задающего устройства (ЗУ) — управляющего экзоскелета, кинематически подобного рабочему манипулятору;

– полуавтоматические роботы, имеющие в качестве ЗУ компактную многостепенную управляющую рукоятку на пульте оператора (в отличие от копирующих роботов), кинематика которой может быть произвольной, удобной для малых движений руки человека; с помощью алгоритмов управления сигналы с рукоятки преобразуются в сигналы управления на приводы манипулятора;

– роботы с супервизорным управлением; человек-оператор задает роботу только команды-целеуказания, а действия робот выполняет автоматически;

– роботы с интерактивным управлением, отличающиеся от супервизорных тем, что они не только принимают команды человека для их исполнения, но и сами активно участвуют в распознавании обстановки и принятии решения, помогая в этом человеку-оператору;

– ЗУ копирующего типа — многозвенные роботизированные устройства, звенья которых непосредственно сопряжены с руками и/или ногами человека, и предназначены для формирования управляющих команд для копирующих роботов;

– силовые экзоскелеты — многозвенные роботизированные устройства, звенья которых непосредственно сопряжены с руками и/или ногами человека, и предназначены для усиления его физических возможностей.

**По конструктивному исполнению** РТС КН подразделяют на следующие классы:

- многостепенные манипуляторы с захватными устройствами разного типа;
- антропоморфные роботы (торсовые, шагающие, на подвижной платформе);
- экзоскелеты (управляющие, силовые);
- мобильные роботы;
- промышленные космические роботы;

• роботы оригинальной конструкции, предназначенные для выполнения отдельных узкоспециализированных операций.

**Особенности дистанционного управления РТС КН.** Важной особенностью РТС КН, обеспечивающей их функционирование в неопределенной среде, является способность удаленного управления РТС человеком-оператором, находящимся непосредственно на Луне или в наземном ЦУП.

Пилотируемая космическая деятельность, характеризуется недетерминированными условиями реализации и широким кругом разнообразных нетиповых операций исследовательского, монтажно-сборочного или ремонтного характера. Вследствие этого представляется перспективным использовать дистанционно управляемые РТС КН с удаленным присутствием в контуре управления человека-оператора. Интеллект человека с его способностью быстрой ориентации в обстановке и принятия решений в непредвиденных ситуациях делает дистанционно управляемых манипуляционных роботов более универсальными. Их применение особенно предпочтительно в нештатных и аварийных ситуациях при отсутствии на космических объектах экипажа.

Наибольшее распространение при дистанционном выполнении работ, особенно в опасных для здоровья человека условиях, получили *копирующие манипуляторы*. Основной особенностью таких манипуляторов является использование ЗУ (экзоскелета), имеющего кинематическое подобие с исполнительным манипуляционным механизмом. При этом упрощаются действия оператора, который, управляя движением ЗУ, совершает естественные движения рукой, свойственные рабочим процессам.

Основная задача системы дистанционного управления копирующего манипулятора — обеспечение максимально точного воспроизведения исполнительным механизмом всех движений ЗУ. Копирующие манипуляторы являются, пожалуй, наиболее универсальными устройствами, позволяющими выполнять разнообразные и самые сложные операции в изменяющихся условиях рабочей зоны [15]. Существуют копирующие манипуляторы одностороннего и двустороннего (с обратной силомоментной связью) действия.

*Копирующие манипуляторы одностороннего действия* (рис. 3), оснащенные только системой

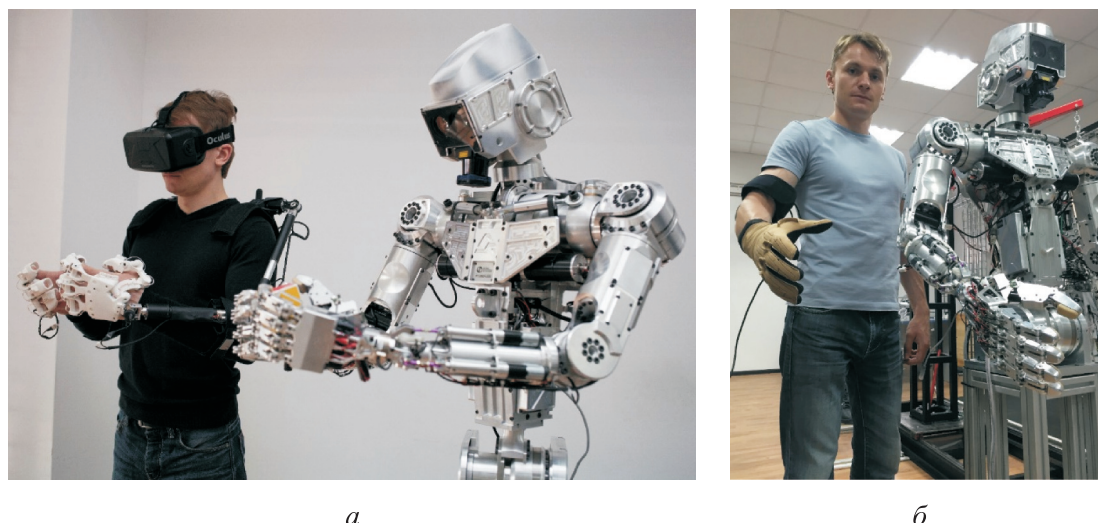


Рис. 3. Примеры задающих экзоскелетов одностороннего действия жесткой (а) и мягкой (б) конструкций

исполнительных приводов по каждой степени подвижности, обеспечивают возможность лишь однонаправленного воздействия на манипуляционный робот со стороны ЗУ, движение которого под действием нагрузки невозможно. К достоинствам таких манипуляторов относятся малые габаритные размеры и масса ЗУ.

Одним из основных недостатков копирующих манипуляторов одностороннего действия является отсутствие у оператора информации о силовом воздействии исполнительного устройства на объект. Единственным источником управляющей информации для оператора слу-

жит визуальный контроль обстановки в рабочей зоне робота, что ограничивает возможности выполнения особо точных технологических манипуляций.

*Копирующие манипуляторы двустороннего действия* (от ЗУ к исполнительному и в обратном направлении), обладая свойством передачи оператору воздействия со стороны нагрузки, обеспечивают наибольшую естественность его действий. Обратную силомоментную связь создают моментные загрузчики, установленные на ЗУ (рис. 4).

При этом масса и габаритные размеры ЗУ существенно возрастают. Человек-оператор, работая с таким манипулятором, способен выполнять самые тонкие и ответственные операции, быстро реагировать на изменяющуюся внешнюю обстановку, исключать соударения и поломки манипулятора.

Исходя из решаемых РТС КН задач, к ЗУ предъявляются высокие требования. Теоретически и экспериментально доказано, что для обеспечения выполнения в копирующем режиме операций с тонкой моторикой необходимо разработать задающую систему, позволяющую считывать с кисти человека до 22...24 сигналов и передавать их на захватное устройство РТС КН.

Кроме того, каждая из степеней подвижности должна обеспечивать обратную силомоментную связь. Технология затрагивает как задающие перчатки, так и звенья исполнительных групп захватных устройств. Усилия, создаваемые захватными устройствами при таком количестве степеней подвижности, должны



Рис. 4. Пример задающего экзоскелета двустороннего действия (с силомоментной обратной связью)



соответствовать или превышать усилия руки мужчины среднего возраста.

Однако наличие у РТС свойств активного отражения усилия, т. е. полной обратимости, не всегда является обязательным. Иногда это может привести к излишней утомляемости оператора, например, если при выполнении операций с предметами требуется сохранять неподвижным их состояние в течение длительного времени. Кроме того, наличие свойств полной обратимости систем двустороннего действия может оказаться опасным для оператора, если со стороны объекта возникает силовое воздействие, превышающее его возможности по какой-либо из степеней подвижности.

Все это приводит к необходимости поиска принципиально новых решений, свободных от перечисленных недостатков. В качестве одного из таких решений рассматривается адаптивное регулирование интенсивности (уровня) обратных связей, приспособляемое к условиям работы конкретного оператора.

АРТС является ярким представителем класса РТС КН, наилучшим образом приспособленным к удаленному управлению человеком-оператором. В зависимости от ситуации АРТС могут функционировать как в автономном и автоматическом режиме, так и в телеоператорном копирующем режиме. Режим удаленного управления АРТС, в частности, копирующий, позволяет человеку-оператору дистанционно управлять роботом естественным и интуитивно понятным способом с помощью ЗУ копирующего типа.

Использование режима удаленного управления АРТС наиболее эффективно в ситуациях неопределенности, когда целеполагание и алгоритм деятельности должны быть гибко адаптированы к изменяющимся внешним условиям. В качестве человека-оператора, управляющего АРТС, может быть член экипажа лунной экспедиции, оператор наземного ЦУП [16] или специалист в какой-либо области.

В силу конструктивных особенностей АРТС КН обладают способностью выполнения тонких манипуляций в антропогенной среде, изначально создаваемой для обитания человека (на орбитальных станциях, в инфраструктуре обитаемых или посещаемых лунных баз). Их преимущество — универсальность. Способность человекоподобных роботов пользоваться ручными инструментами, подавать и придерживать предметы, а также выполнять множество

ПО, изначально спроектированных для человека, открывает широкие перспективы их применения как помощников космонавтов.

Это позволит возложить на АРТС часть рутинных ПО экипажа по обслуживанию элементов перспективной системы средств обитания инфраструктуры напланетного и космического базирования, обеспечивающей проведение полного спектра целевых функций пилотируемой космонавтики. Выполняя эти операции в автоматическом режиме с помощью АРТС, можно существенно увеличить время, отводимое экипажу для решения творческих, научных и прикладных задач, проведения исследований и экспериментов в космосе.

Мобильные роботы-андроиды можно также использовать для проведения особо опасных операций внекорабельной деятельности, инспектирования аварийных или опасных объектов. Другим важным направлением применения АРТС может стать поддержание аварийных и ремонтно-восстановительных работ при отсутствии экипажа.

Повышение степени интеллектуальности приведет к появлению новых классов дистанционно управляемых роботов с большей степенью автономности. Это класс дистанционно управляемых роботов с супервизорным управлением, где человек-оператор выполняет функции целеуказания, а программа действий реализуется роботом самостоятельно. Класс дистанционно управляемых роботов с интерактивным управлением обладает еще большей степенью интеллектуальности. Робот не только принимает от человека команды-целеуказания для их исполнения, но и сам активно участвует в распознавании обстановки и принятии решения, помогая в этом человеку-оператору (реализуя функцию советующей системы).

**Направления работ по созданию РТС для российской ЛП.** Чтобы создать эффективные РТС КН, необходимо разработать и отработать ключевые (базовые) технологии робототехники в условиях космического пространства. Эти технологии находятся на пересечении таких областей знаний, как механика, электроника, управление и программирование, что схематически отражено на рис. 5 [14].

Следует отметить, что основу ключевых технологий космической робототехники должны составлять современные технологии ИИ: тех-



Рис. 5. Карта ключевых технологий космической робототехники:  
Р — робототехника; САПР — система автоматизированного проектирования

ническое зрение, автономная навигация, кинестетическое очувствление, телеуправление с эффектом телеприсутствия человека-оператора, интеллектуальный человеко-машинный интерфейс (ЧМ-интефейс, включающий в себя интеллектуальные технологии поддержки принятия решений космонавтами), машинное обучение роботов и др.

В начале 2020 г. Роскосмос предложил проект дорожной карты целевых работ на МКС в интересах робототехнического обеспечения ЛП. Основные направления работ касаются трех видов космической робототехники [9].

1. *Технологические РТС*, предназначенные для выполнения сборочных и других технологических работ, которые заранее определены и могут быть отработаны в наземных условиях. Проведение операций с полезным грузом осуществляется универсальным захватным устройством или с помощью специальных съемных инструментов. Такие РТС оснащены системами технического зрения и силомоментного очувствления для адаптации к изменениям детерминированной среды и работе с полезными грузами. Основной режим управления — автоматический, с возможностью ручного режима управления от семистепенной рукоятки.

2. *Антропоморфные РТС*, применяемые для работы на космических объектах и напланетных базах. Антропоморфные роботы предназначены для выполнения работ либо в недетерминированной среде, либо в нестандартных ситуациях, которые не могут быть определены заранее и могут быть выполнены стандартным инструментом, созданным для космонавта.

Основной режим управления — копирующий от ЗУ, управляемого человеком-оператором. Для отдельного класса задач предусмотрена возможность реализации автономных режимов управления. Выполнение операций с полезным грузом осуществляется универсальным конечным устройством в виде «человеческой руки». Благодаря этому для выполнения операций можно использовать инфраструктуру, созданную для космонавтов (инструменты, поручни и т. п.).

Для эффективной работы оператора ЗУ таких РТС должны быть оснащены системами телеприсутствия и отображения усилий. В перспективе оснащение таких роботов современной датчиковой аппаратурой, системой технического зрения и элементами ИИ позволит их применять для выполнения операций в недетерминированной среде в удаленном

супервизорном и интерактивном режимах управления.

Для разработки ключевых технологий, необходимых при создании перспективных АРТС, предлагается создать и экспериментально отработать дистанционно-управляемого антропоморфного робота с расширенным функционалом. Опытный образец такой АРТС будет способен работать внутри гермоотсеков станции и на ее внешней поверхности при внекорабельной деятельности как в копирующем режиме, так и в автономном, используя технологии ИИ.

3. *Грузовые и логистические РТС*, предназначенные для работы на космических объектах и напланетных базах с целью автоматизации транспортировочных и погрузочных задач. Для разработки ключевых технологий, необходимых при создании грузовых напланетных РТС, предлагается начать опытно-конструкторские работы по созданию и экспериментальной отработке телеуправляемой робототехнической платформы на колесном шасси, предназначенной для исследования и освоения планет.

## Выводы

1. Успешная реализация планов по освоению и использованию Луны, а также других космических объектов, во многом будет зависеть от эффективности применяемых РТС, сопоставления факторов необходимости, возможности и экономической обоснованности. Поэтому исследования в области технологий роботизированной поддержки космической деятельности, создание и экспериментальная отработка образцов роботизированных систем являются чрезвычайно важными и актуальными задачами.

2. С учетом наметившейся острой конкурентной борьбы государств в космосе за освоение Луны, ее ресурсов и отсутствия опыта применения российских РТС КН указанное направление нуждается в интенсивном развитии. Следовательно, работы в данном направлении необходимо вывести на уровень стратегической задачи государства. Технологические преимущества в космосе напрямую влияют на геополитическую обстановку на Земле.

## Литература

- [1] Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М. Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы. *Земля и Вселенная*, 2019, № 4(328), с. 16–38, doi: 10.7868/S0044394819040029
- [2] Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Сохин И.Г. Эргономические проблемы создания и применения антропоморфных роботов-помощников экипажей перспективных космических миссий. *Экстремальная робототехника. 26-я науч.-техн. конф.*, Санкт-Петербург, 8–9 октября 2015, Санкт-Петербург, Изд-во Политехника-сервис, с. 191–199.
- [3] Сорокин В.Г., Сохин И.Г. Возможные области применения антропоморфных роботов-помощников экипажей в отсеках перспективных космических комплексов. *Пилотируемые полеты в космос*, 2015, № 4(17), с. 71–79.
- [4] Сосюрка Ю.Б., Сохин И.Г., Долгов П.П., Каспранский Р.Р. Актуальные проблемы пилотируемых полетов к Луне: новые задачи отбора и подготовки экипажей лунных экспедиций. *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, 2014, № 6, с. 21–28.
- [5] Sokhin I.G., Kuritsin A.A., Lonchakov Yu.V., Sivolap V.A., Sosjurka Yu.I., Malenchenko Yu.I. The study of topical issues related to the features of the moon expeditions activity. *68 International Astronautical Congress*, Adelaide, 25–29 September 2017, IAC-17.B3.5.5x38604.
- [6] Богданов А.А., Сычков В.Б., Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М. Создание и исследование робототехнической системы с интерактивным управлением. *Решетневские чтения. Матер. XVI междунар. науч. конф.*, Красноярск, 7–9 ноября 2012, в 2 ч. Ч. 1, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2012, с. 230–231.
- [7] Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Сычков В.Б. Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения. *Решетневские чтения. Матер. XVII Междунар. науч. конф.*, Красноярск, 12–14 ноября 2013, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, в 2 ч. Ч. 1, 2013, с. 278–280.
- [8] Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Дудоров Е.А., Пермяков А.Ф., Пронин А.А. Исследование возможности использования дистанционно-управляемого антропоморфного робота в условиях космического полета. *Робототехника и искусственный интеллект. Матер. XI Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием*, Железногорск, 14 декабря 2019, Красноярск, ЛИТЕРА, 2019, с. 88–93.

- [9] Богданов А.А., Дудоров Е.А., Пермяков А.Ф., Рыбак Е.В., Сохин И.Г. Искусственный интеллект в робототехнических системах космического назначения. *Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы применения*, Москва, Радиотехника, 2020, с. 195–259.
- [10] ГОСТ Р ИСО 8373–2014. *Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 2014.
- [11] ГОСТ Р 60.0.0.1–2016. *Роботы и робототехнические устройства. Общие положения*. Москва, Стандартинформ, 2016.
- [12] ГОСТ Р 60.0.0.2–2016. *Роботы и робототехнические устройства. Классификация*. Москва, Стандартинформ, 2016.
- [13] ГОСТ Р 60.0.2.1–2016. *Роботы и робототехнические устройства. Общие требования по безопасности*. Москва, Стандартинформ, 2016.
- [14] Попов Е.П., Юревич Е.И., ред. *Робототехника*. Москва, Машиностроение, 1984. 288 с.
- [15] Bogdanov A., Dudorov E., Kutlubayev I., Permyakov A., Pronin A. Control System of a Manipulator of the Anthropomorphic Robot FEDOR. *12<sup>th</sup> International Conference on Developments in e-Systems Engineering*, 7–10 October 2019, Kazan, IEEE, INSPEC Accession Number 9557273, 2019, pp. 449–453, doi: 10.1109/DeSE.2019.00088
- [16] Дудоров Е.А., Бабкин Е.В., Брыков В.А., Зорин Ю.А., Пермяков А.Ф., Рыбак Е.В., Сохин И.Г. *Первые результаты использования антропоморфного робота на международной космической станции*. URL: <http://tsniimash.ru/science/> (дата обращения 15 июня 2020).

## References

- [1] Mitrofanov I.G., Zelenyy L.M. On the exploration of the moon. Plans and nearest prospects. *Zemlya i Vseennaya*, 2019, no. 4(328), pp. 16–38 (in Russ.), doi: 10.7868/S0044394819040029
- [2] Lonchakov Yu.V., Sivolap V.A., Sokhin I.G. *Ergonomic problems of creation of anthropomorphic robotic crew assistants for future space missions. Ekstremal'naya robototekhnika. 26-ya nauch.-tekhn. konf.* [Proceedings of the International Scientific and Technological Conference Extreme Robotics]. Saint-Petersburg, pp. 191–199.
- [3] Sorokin V.G., Sokhin I.G. Feasible application of anthropomorphic robotic assistants to support a crew inside the modules of future space complexes. *Pilotiruyemyye polety v kosmos*, 2015, no. 4(17), pp. 71–79 (in Russ.).
- [4] Sosyurka Yu.B., Sokhin I.G., Dolgov P.P., Kaspranskiy R.R. Actual issues of manned space flight to the moon: new tasks of crew's selection and training for lunar missions. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*, 2014, no. 6, pp. 21–28 (in Russ.).
- [5] Sokhin I.G., Kuritsin A.A., Lonchakov Yu.V., Sivolap V.A., Sosjurka Yu.I., Malenchenko Yu.I. The study of topical issues related to the features of the moon expeditions activity. *68 International Astronautical Congress*, Adelaide, 25–29 September 2017, IAC-17.B3.5.5x38604.
- [6] Bogdanov A.A., Sychkov V.B., Zhidenko I.G., Kutlubayev I.M. Creating and investigation of robotic system with interactive control. *Reshetnevskiy chteniye. Mater. XVI mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev readings. Materials of the XVI international scientific conference]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 230–231.
- [7] Zhidenko I.G., Kutlubayev I.M., Bogdanov A.A., Sychkov V.B. Basis of structural scheme selection of space application robots. *Reshetnevskiy chteniye. Mater. XVII mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev readings. Materials of the XVII international scientific conference]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 278–280.
- [8] Kutlubayev I.M., Bogdanov A.A., Dudorov E.A., Permyakov A.F., Pronin A.A. Investigation of the possibility of using a remote-controlled anthropomorphic robot in space flight. *Robototekhnika i iskusstvennyy intellekt. Mater. XI Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem* [Robotics and artificial intelligence. Materials of the XI all-Russian scientific and technical conference with international participation]. Zheleznogorsk, 2019, pp. 88–93.
- [9] Bogdanov A.A., Dudorov E.A., Permyakov A.F., Rybak E.V., Sokhin I.G. Artificial intelligence in space-based robotic systems. *Iskusstvennyy intellekt v kosmicheskoy tekhnike: sos-*

- toyaniye, perspektivy primeneniya* [Artificial intelligence in space technology: state and prospects of application]. Moscow, Radiotekhnika publ., 2020, pp. 195–259.
- [10] GOST R ISO 8373–2014. *Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Terminy i opredeleniya* [State Standard ISO 8373–2014. Robots and robotic devices. Vocabulary]. Moscow, Standartinform publ., 2014.
- [11] GOST R 60.0.0.1–2016. *Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Obshchiye polozheniya* [State Standard R 60.0.0.1–2016. Robots and robotic devices. General principles]. Moscow, Standartinform publ., 2016.
- [12] GOST R 60.0.0.2–2016. *Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Klassifikatsiya* [State Standard R 60.0.0.2–2016. Robots and robotic devices. Classification]. Moscow, Standartinform publ., 2016.
- [13] GOST R 60.0.2.1–2016. *Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Obshchiye trebovaniya po bezopasnosti* [State Standard R 60.0.2.1–2016. Robots and robotic devices. General requirements for safety]. Moscow, Standartinform publ., 2016.
- [14] *Robototekhnika* [Robotics]. Ed. Popov E.P., Yurevich E.I. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1984. 288 p.
- [15] Bogdanov A., Dudorov E., Kutlubayev I., Permyakov A., Pronin A. Control System of a Manipulator of the Anthropomorphic Robot FEDOR. *12<sup>th</sup> International Conference on Developments in e-Systems Engineering*, Kazan, IEEE, INSPEC Accession Number 9557273, 2019, pp. 449–453, doi: 10.1109/DeSE.2019.00088
- [16] Dudorov E.A., Babkin E.V., Brykov V.A., Zorin Yu.A., Permyakov A.F., Rybak E.V., Sokhin I.G. *First results of using an anthropomorphic robot on the international space station*. Available at: <http://tsniimash.ru/science/> (accessed 15 June 2020).

Статья поступила в редакцию 15.08.2020

## Информация об авторах

**ДУДОРОВ Евгений Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры МиТОДиМ. МГТУ им Г.И. Носова; лауреат премии РФ в области науки и техники, исполнительный директор. АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: dudorov@npo-at.com).

**СОХИН Игорь Георгиевич** — доктор технических наук, научный руководитель. АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: isokhin@yandex.ru).

## Information about the authors

**DUDOROV Evgeniy Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machines and Technologies of Pressure Treatment and Mechanical Engineering. Nosov Magnitogorsk State Technical University; winner of the Russian Federation award in the field of science and technology, Executive Director. AO Research and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: dudorov@npo-at.com).

**SOKHIN Igor Georgievich** — Doctor of Science (Eng.), Research Manager. AO Research and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: isokhin@yandex.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дудоров Е.А., Сохин И.Г. Предназначение и задачи робототехнических систем в российской лунной программе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 12, с. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2020-12-3-15

### Please cite this article in English as:

Dudorov E.A., Sokhin I.G. The Purpose and Tasks of Robotic Systems in the Russian Lunar Program. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 12, pp. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2020-12-3-15