

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧЕЛОВЕКА И РОБОТА В ПИЛОТИРУЕМОМ КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД**

А.А. Карпов, С.Ф. Сергеев, О.И. Лахин, М.В. Михайлюк,  
Б.И. Крючков, В.М. Усов

А.А. Карпов (Санкт-Петербургский институт информатики  
и автоматизации РАН)

С.Ф. Сергеев (Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого)

О.И. Лахин (ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара)

М.В. Михайлюк (ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт  
системных исследований РАН»)

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; докт. мед. наук, профессор В.М. Усов  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Применение робототехнических систем (РТС) в перспективных пилотируемых полетах требует создания у космонавта целостного представления о формах взаимодействий в системе «человек–робот» в неблагоприятных условиях окружающей среды. Для этого необходимо создание учебно-справочных материалов (УСМ) по данному направлению эргономики современных человекомашинных интерфейсов (ЧМИ). В статье рассматривается применение онтологического подхода при разработке УСМ для междисциплинарной интеграции различных научных областей – информатики, эргономики, психофизиологии применительно к ЧМИ.

**Ключевые слова:** космическая робототехника; взаимодействие в системе «человек–робот»; эргономика человекомашинных интерфейсов; учебно-справочные материалы (УСМ); предметная онтология.

### **Human-Robot Interaction in a Manned Space Flight: An Ontological Approach. A.A. Karpov, S.F. Sergeev, O.I. Lakhin, M.V. Mikchailyuk, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov**

The use of robotic systems (RSs) in future manned space missions requires the creation of the cosmonaut-researcher a holistic view on the forms of interaction within the “human–robot” system (HRS) under the adverse environmental conditions. For these purposes, educational and reference materials (ERMs) are needed in fields of ergonomics and its representation in the design of human-machine interfaces (HMI). The paper considers the application of the ontological approach in the actual subject area – the ergonomics of the HMI, as the way of interdisciplinary integration various scientific fields – Informatics, ergonomics, psychophysiology, etc.

**Keywords:** space robotics; interaction within the “human–robot” system; ergonomics of human-machine interfaces; educational reference materials (ERMs), subject ontology.

Вопросы эффективного применения робототехнических систем (РТС) в пилотируемых полетах находятся в фокусе внимания специалистов космической техники, в том числе применительно к планам освоения и колонизации Луны. Для их решения безусловно необходима специальная профессиональная подготовка членов экипажей. В свою очередь, подготовка лиц опасных профессий к предстоящей эксплуатации РТС в экстремальной среде выявляет необходимость методических, учебных и справочных материалов (УСМ), адресованных непосредственно потребителю этой продукции, то есть пользователю РТС, из которых он мог бы почерпнуть сведения как о преимуществах применения космических роботов, так и о трудностях, с которыми можно столкнуться при их эксплуатации. Возникает ряд новых вопросов, связанных со своевременной проработкой и освоением большого комплекса УСМ, раскрывающих принципы взаимодействия космонавтов и космических роботов, а также наличие психофизиологических ограничений человека, действующего в экстремальной среде с пониженной гравитацией. Эмпирической базой для УСМ может служить большой и постоянно обновляемый массив информации по ведущимся разноплановым разработкам космических РТС в рамках текущих космических программ [1, 2].

Перспективный подход сегодня – представление накопленных знаний с позиций рассмотрения космонавта как пользователя в антропоцентрической системе «человек–робот», уделяя преимущественное внимание возможности использования РТС в контексте целей деятельности ЧО, что приводит к обоснованию подходящего типа ЧМИ с позиций учета человеческого фактора (ЧФ). Дополнительные аргументы в пользу тех или иных видов ЧМИ можно представить обучаемому в процессе наглядной демонстрации результатов компьютерного моделирования и визуализации интерактивной виртуальной среды, включающей цифровые модели роботов. Фактически это означает необходимость дополнительно к УСМ разработку лабораторных комплексов (компьютерных стендов), максимально открытых для модификации по мере изменения постановок эргономических испытаний и психофизиологических экспериментов.

В настоящей статье не предполагается освещение вопросов взаимодействия космонавтов с транспортными роботами-манипуляторами, штатно применяемыми на МКС, и ранее на кораблях типа «Спейс-Шаттл», «Буран» и орбитальных станциях «Мир». Основанием для их исключения из рассмотрения в данной статье послужил тот факт, что в целом вопросы обучения и тренировки космонавтов к управлению такими РТС уже решены, а интерфейс детально описан в большом числе работ.

Из множества предлагаемых решений в области космических РТС и постановок КЭ в основном разделе настоящей статьи первоочередное внимание планируется уделить антропоморфным РТС, поскольку появление антропоморфного робота NASA «Robonaut-2» и отечественного робота

«Федор» или FEDOR (Final Experimental Demonstration Object Research) на МКС способствовало интересу к обсуждаемой проблеме [2].

### **Преимущества онтологического подхода при изучении предметной области**

Одна из актуальных проблем в сфере профессионального образования – внедрение новых информационных технологий для привлечения обучаемых к мыслительной деятельности и для активного применения приобретенных знаний. Именно в этом отношении, по нашему мнению, онтологический подход особенно актуален и конструктивен.

Разработка онтологий – «формальных явных описаний терминов предметной области и отношений между ними» (Gruber, 1993) – представлена в виде руководства для экспертов по предметным областям в ряде работ разных лет [3–6].

Как следует из цитированных источников, потребность в разработке онтологии обусловлена возможностями:

- совместного использования людьми или программными агентами Semantic Web для общего понимания структуры информации;
- повторного использования знаний в конкретной предметной области;
- явного задания допущений в предметной области;
- анализа знаний в предметной области.

На основе методов формализации и программного инструментария для моделирования сложных систем на базе онтологий, имеется возможность формализации некоторой области (предметных) знаний с помощью концептуальной схемы [7, 8].

Использование онтологий позволяет более определенно говорить о выделении какого-то направления исследований в научную или учебную дисциплину. Именно по дисциплинарному принципу сегодня организованы базы знаний в системе подготовки специалистов [9].

Есть основания утверждать, что при наличии в новых проблемных областях мультидисциплинарных вопросов (для которых возможно различное прочтение экспертами приоритетных направлений их решения и выбора соответствующих концептуальных подходов) предпочтительно опираться на схемы декларативного описания и на формы графического представления отношений понятий в предметной области. Их явное задание собственно и рассчитано на достижение консенсуса экспертов.

В контексте задачи разработки УСМ по конкретной предметной области знаний *онтология* – это технология, позволяющая осуществить представление знаний эксперта о предметной области, учитывая базовые понятия и их взаимосвязи, и при этом обеспечить наглядность представления знаний, объединение материала из различных источников и сред, конкретизацию логических связей. Именно этим определяется полезность онтологического

подхода в области подготовки специалистов в новых областях науки и техники [10–13].

На проектирование предметной онтологии значимо влияют особенности понимания экспертом концептов и их связей в конкретной области знаний. В этой связи можно констатировать, что единственной «правильной методологии» разработки онтологий не существует. Однако в этом и есть определенное преимущество данного подхода – имеется возможность отразить при необходимости весь спектр экспертных мнений, особенности толкования терминов с позиций разных научных дисциплин, чтобы уяснить предмет расхождений и уже на этой основе искать консенсус [6].

### **Взаимодействие в системе «человек–робот» с точки зрения распределения функций**

Распределение функций в сложной системе «человек–техника» является одной из ключевых проблем проективной инженерной психологии и эргономики, и именно в контексте этой проблемы необходимо трактовать взаимодействие человека и робота в разных условиях функционирования и при разных способах «делегирования» функций от человека роботу.

В определенном смысле распределение функций в системе «человек–робот» самым непосредственным образом влияет на способ построения предметной онтологии эргономики интерфейсов. При этом актуальные вопросы распределения функций в сложных системах не могут быть решены «раз и навсегда», поскольку человек по мере совершенствования технологий, особенно в информационной сфере, ставит перед собой все более сложные и масштабные задачи, которые основаны на совершенствовании средств труда, и, чаще всего, они в корне меняют психологическое содержание деятельности и приоритеты освоения профессии.

Вопрос о том, какие функции из числа тех, которые должна выполнять система «человек–робот», доверить роботу, а какие остаются в сфере ответственности человека, возникает уже на этапе анализа и проектирования эргатических систем [14, 15].

Следуя результатам, полученным в [16], можно выделить несколько стратегий или концепций проективной эргономики. В соответствии с изложенной в этой работе классификацией концепций, определяющих тактику и стратегию интеграции человека и машины в процессе эргономического проектирования, применительно к экстремальной робототехнике возможен синтез следующих взаимодополняющих концепций:

а) *роботоцентрического подхода* (как варианта *машиноцентрического*), содержащего спецификации функционала отдельных роботов, предназначенных для экстремальных условий, предусматривают повышенные требования к возможностям сбора и передачи информации об их техническом состоянии, текущей решаемой задаче, местоположении, результатах ведения

ориентировки, навигации и применения бортовых систем для обнаружения и идентификации искусственных стационарных и подвижных объектов;

б) *симбиотического подхода*, направленного на достижение синергетического эффекта в гибридных системах, чтобы обеспечить согласованную активность роботов и возможность осуществления приоритетного контроля со стороны ЧО, в том числе для групп роботов;

в) *антропоцентрического подхода* к взаимодействию космонавтов с роботами в ходе плановых задач, подразумевающего приоритет человека в принятии решений в интересах надежности выполнения полезных операций и использующего роботов как средство достижения поставленных перед экипажем целей.

Учитывая приоритеты обеспечения безопасности космических полетов и значительную долю предстоящих испытательных задач в перспективных планах освоения Луны, можно полагать, что одна из главных дидактических задач УСМ для космонавтов состоит именно в том, чтобы показать возможность реализации антропоцентрического подхода к распределению функций между космонавтом и роботом. Это позволяет продемонстрировать существенные преимущества усиления функционала роботов при их «содружественном» функционировании в составе группы совместно с человеком.

Такая направленность УСМ позволяет следовать логике развития отрасли и доминирующих трендов, которая состоит в постоянном расширении функционала роботов от реализации простых двигательных функций и заканчивая использованием возможностей развитых сенсорных систем и искусственного интеллекта (ИИ). Дополнительно в фокус внимания попадают решаемые РТС задачи навигации и ориентировки в среде, коммуникации в составе группы, коммуникации с ЧО, повышения автономности при постепенном расширении перечня решаемых РТС задач. При этом не допускается исключение человека-оператора (ЧО) из процесса принятия решения и ограничения его полномочий при контроле ситуации в целом, предусматривая возможность экстренного вмешательства при нештатном протекании запланированных операций [17].

Изучение аналогов и прототипов из ряда предметных областей показывает, что на различных этапах «эволюции роботов» удавалось в разном объеме делегировать полномочия от человека роботу, и, чаще всего, оказывалось, что практически полезные варианты достигаются активным участием человека в выполнении трудовых функций, что видно на примере выполнения физических видов труда, предполагающих задействование движений рук человека и, соответственно, манипуляторов роботов.

Рассмотрим один из специальных видов интерфейса «человек–робот», которые базируются на системах «захвата движения» (*англ.*: Motion Capture Devices), в первую очередь механического захвата с помощью так называемых «экзоскелетов».

Для этого вначале необходимо выделить и конкретизировать описание понятия «рабочая среда» в предметной онтологии взаимодействия «космонавт–робот» с позиций учета ЧФ. Это понятие охватывает совокупность действующих на ЧО факторов, что с точки зрения традиционных подходов позволяет задать дихотомическое деление: «обычная» и «экстремальная» среда. Для каждого различаемого объекта класса «рабочая среда» можно задать вербальное описание отличительных признаков (например, наличие вредных для человека физических, химических, биологических факторов; необычный состав психологически трудных условий или труднопереносимых организмом стрессовых воздействий; невозможность работы без средств защиты или передвижения без специальных транспортных средств и др.). Это положение можно проиллюстрировать на рис. 1.

Примеры применения роботов в обычной среде достаточно многочисленны, и для них характерно предположение о возможности обеспечить для человека (оператора, контролера, диспетчера, наладчика и пр.) безопасные условия труда, когда в процессе функционирования системы «человек–робот» не предвидится наличие экстремальных факторов, за исключением отдельных казуистических (редких, непредвиденных, внеплановых, нетипичных и т.п.) обстоятельств.



Рис. 1. Класс объектов «рабочая среда» с точки зрения ограничений человеческого фактора

Во многих случаях, тем не менее, в рассмотрение дополнительно вводятся объекты специального снаряжения для защиты организма оператора от потенциально опасных инцидентов, что, собственно, и позволяет обеспечить безопасность и снизить риски здоровью, но, одновременно, может затруднить взаимодействие человека и робота, ограничить возможности реализации двигательных функций в специальном снаряжении.

Экстремальная среда предполагает наличие факторов, которые создают повышенные нагрузки на человека, несут риски нештатных ситуаций, требуют защитных средств и особого порядка организации трудовой деятельности для обеспечения безопасности. Поэтому для экстремальной среды применение роботов не просто оправдано, но и жизненно необходимо, особенно в тех случаях, когда использование защитного снаряжения резко ограничивает двигательные возможности человека, как например, космонавта, одетого в скафандр.

В качестве простого случая рассматривается вариант, когда человек и робот могут взаимодействовать в одной и той же физической рабочей среде и даже в непосредственной близости друг от друга. Так называемое контактное взаимодействие допускает не только зрительный контакт со стороны человека, но и физический контакт рук человека и манипуляторов робота, если предполагается совместное воздействие на объект труда. Примерами служат перенос и передача груза или инструмента.

Применение сервисного робота во внутрикорабельной деятельности экипажа в качестве робота-помощника с ассистивными функциями предполагает обеспечение гомеостаза организма человека в искусственной среде обитания и выполнение эргономических требований по безопасности при передвижениях в рабочем пространстве [18].

На рис. 2 показаны возможные формы взаимодействия в системе «человек–робот» в обычной и экстремальной среде.

В экстремальных ситуациях, о которых речь шла выше, человек не может физически присутствовать (или длительно пребывать) в той же физической среде, что и робот, из-за высоких опасностей воздействия патогенного фактора (опасного для жизни и здоровья человека), например, в разгерметизированном отсеке орбитальной станции.

Решение проблемы состоит в пространственном «разнесении» рабочего окружения для синхронно взаимодействующих в едином масштабе времени активных агентов: человек работает на определенном удалении от робота в безопасной (защищенной) рабочей среде, то есть дистанционно, а робот функционирует под контролем человека в экстремальной внешней среде, в том числе, при авариях, как следствиях нештатных ситуаций (НШС) и отказов техники. В практическом отношении наиболее естественное решение состоит в том, чтобы разместить ЧО (создать его рабочее место) в условиях, гарантирующих безопасность функционирования, в то время как робот может располагаться в зоне повышенного риска (в зоне действия

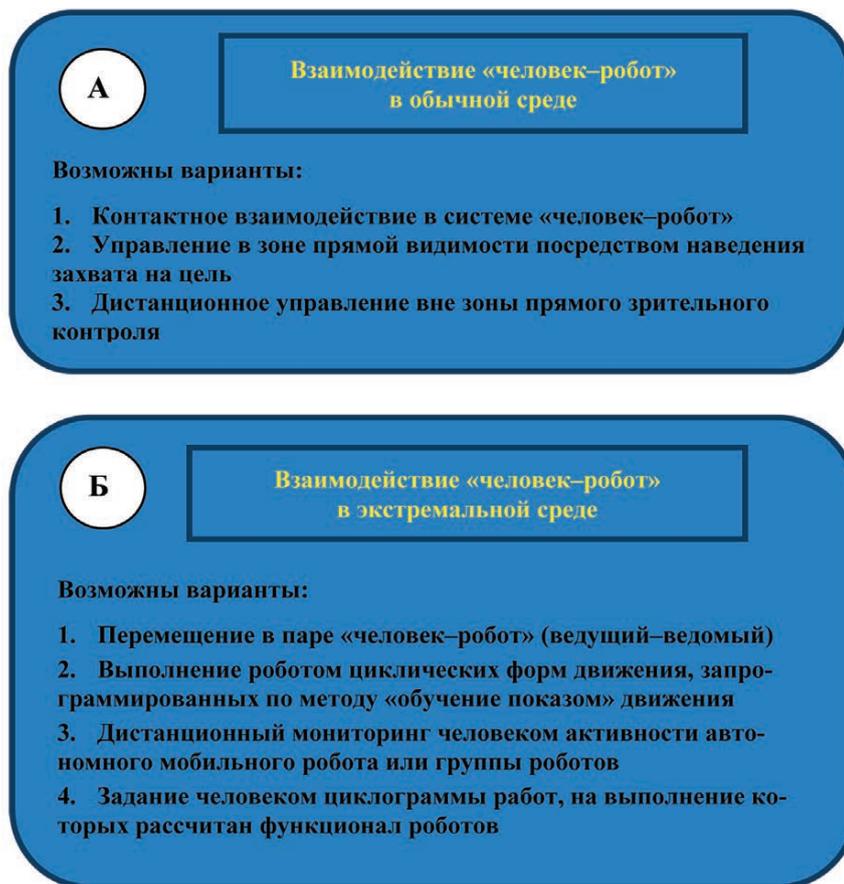


Рис. 2. Возможные формы взаимодействия в системе «человек–робот»: (А) в обычной среде; (Б) в экстремальной среде

экстремального фактора или в других непригодных для обитания человека условиях). Для того, чтобы робот выполнял с «объектом воздействия» необходимые для ЧО манипуляции в экстремальной среде, необходимо обеспечить решение сразу нескольких задач, которые связаны с понятием «дистанционного взаимодействия».

С помощью задающих управляющих устройств (например, задающих устройств перемещений звеньев манипулятора) от ЧО необходимо передавать командную информацию для исполнения роботу, и, одновременно, из экстремальной среды собирать необходимые данные для принятия ЧО решения, какие манипуляции предстоит выполнить, а после их выполнения – достигнут ли результат и с каким качеством. Именно эта вторая задача, связанная с организацией для ЧО своевременной полноценной обратной связи, является наиболее трудной, и от ее решения во многом зависит качество телеуправления космическим роботом.

Применительно к экстремальной космической робототехнике важно подчеркнуть, что, несмотря на всестороннюю подготовку космонавта к космическому орбитальному полету (что неоднократно проявлялось в аварийной обстановке), не исключены обстоятельства и ситуации, которые носят угрожающий жизни характер, и именно в этих ситуациях не следует подвергать человека чрезмерному риску, в то время как робот может функционировать в жестких условиях среды при наличии у него требуемого функционала. Безусловно, что не сопоставимы по тяжести исходы: потери пусть даже дорогостоящей техники при авариях и тяжелые травмы или гибель человека. Таким образом, целесообразно дополнить отношение «взаимодействие» между объектами «человек» и «робот» их отношениями (каждого по отдельности и при рассмотрении в единстве местоположения и позиционирования) с онтологическим объектом «рабочая среда», имея в виду реально существующие физические рабочие среды – на поверхности орбитального комплекса, в разгерметизированном отсеке, на поверхности Луны и др.

В предметной онтологии описание объектов должно включать:

1) отношения между ЧО и защищенной средой, в которой для него предусмотрены средства жизнеобеспечения и дистанционного управления роботом (то есть средства ЧМИ, «обращенные» к человеку окончательными устройствами типа многостепенных ручек, джойстиков, пультов управления и ряда специализированных устройств «захвата движения» и пр.);

2) отношения между роботом и экстремальной средой (в том числе и с условиями аварийной обстановки), в которой робот должен выполнять команды ЧО по отношению к конкретному объекту воздействия (это могут быть, например, точки возгорания, инструмент пожаротушения, дефект в оболочке станции при разгерметизации, вентиль и т.д.).

На рис. 3 представлена схема, в которой разделены рабочие среды ЧО и робота, которым он управляет. Одновременно показано, что образ экстремальной среды может быть воспроизведен с высокой степенью достоверности в виде виртуального окружения, которое позволяет в реальном масштабе времени обеспечить визуализацию текущей ситуации.

Таким образом, если принять разделение рабочей среды на две части, которые пространственно удалены друг от друга и различаются своими экологическими и физиолого-гигиеническими параметрами, то необходимо дополнительно предусматривать описание средств поддержания коммуникации и связи между двумя этими рабочими средами, которые позволяют в оперативном режиме передавать команды управления от человека к роботу и получать сигналы обратной связи о достигнутых результатах.

Если эти две части, которые разнесены пространственно на небольшое расстояние, например, разные отсеки одной и той же орбитальной станции, то скорость обмена данными не является лимитирующим условием взаимодействия «человек–робот» при ведении коммуникации и интерактивном обмене данными по каналам связи, что позволяет поддерживать режим



Рис. 3. Отношения объектов «человек–робот–рабочая среда» для физически существующих рабочих сред и их отображение для виртуального окружения

реального времени управления роботом (то есть значимые «события» в этих рабочих средах полностью синхронизированы с точки зрения ЧО). Другими словами, пространственный фактор не затрудняет взаимодействие коммуникантов в распределенной рабочей среде. Но на значительном удалении, например, при управлении с Земли роботом, находящимся на окололунной станции или на лунной поверхности, фактор удаленности (на «космические расстояния») может стать критическим с точки зрения надежности операторской деятельности из-за задержек прохождения сигналов по линиям связи и дополнительных трудностей в этой связи для реализации обратной связи в контуре управления [19].

Суть воздействия негативного фактора временных задержек – в его влиянии на точность восприятия человеком истинного положения робота относительно объектов в локальной системе координат, трудности правильной оценки относительной скорости движения объектов в рабочей среде и проявление других известных из авиакосмической физиологии эффектов нарушения константности восприятия окружающей среды, особенно при опосредованном восприятии физически удаленной среды через оптоэлектронные или телевизионные средства наблюдения окружающей робота и объект воздействия среды. Проводимые космические эксперименты (серия «Контур-1», «Контур-2» и ожидаемое их продолжение «Контур-3») показывают

принципиальную возможность построения телеуправления с задержками передачи сигналов, как правило, не превышающими две секунды, что согласуется с ранее установленными психофизиологическими закономерностями константности восприятия человека в условиях экспериментального лабораторного моделирования.

Рассмотренный пример построения фрагмента онтологии, касающейся взаимоотношений в системе «ЧО–робот–рабочая среда», поднимает ряд вопросов дидактического характера.

Основные из них:

- в каком смысле можно говорить о подобии строения тела человека и конструкции робота;
- как сделать кинетически и динамически подобными функционирование исполнительных звеньев человека и робота;
- как обеспечить ведение ориентировки по результатам восприятия внешней обстановки человеком и выполнения измерений бортовыми системами робота (и какие датчики и сенсоры для этого нужны);
- как научиться распознать объект на расстоянии с помощью бортовых устройств робота;
- как воспроизвести на расстоянии те движения, которые совершил бы человек, если бы он был на месте робота;
- как средствами наблюдения в составе робота обеспечить индикацию визуальной картины ЧО и достаточно ли этого человеку для владения ситуацией;
- можно ли добиться «понимания» роботом семантики принятия решений ЧО об активности в рабочей среде на основе некоторой заранее сформированной «картины внешнего мира», хранящейся в памяти робота.

В целом перечисленные вопросы улучшения взаимодействия человека и робота можно трактовать как достижение «ситуационной осведомленности» ЧО о тактической ситуации применительно к задачам организации информационного обеспечения космонавта при телеуправлении роботом.

При изучении вариантов построения взаимодействий в системе «человек–робот» первоначально следует сделать акцент на относительно простые случаи, когда человек управляет роботом в копирующем режиме для воспроизведения некоторого набора простых двигательных актов. Суть дела хорошо передает английский эквивалент копирующего управления «Master-Slave Mode» – в буквальном переводе «режим хозяин–слуга». В этом режиме все решения принимает человек, при этом в его распоряжении имеются возможности реализации его двигательных функций в достаточно широком диапазоне, а функции робота состоят в правильном воспроизведении задаваемых ему двигательных актов и предоставления ЧО данных для построения канала обратной связи. В краткой формулировке, принимать решения и задавать команды должен человек, а их исполнять (буквально воспроизводить движения рук ЧО) – антропоморфный робот (андроид).

Для конкретизации способа управления и вида интерфейса обратимся к классу антропоморфных роботов-манипуляторов. Эти роботы имеют конструкцию, которая во многом напоминает строение человеческого тела. Особенно заметное сходство имеют конечности человека – руки и ноги, имеющие несколько суставов, что обеспечивает огромное число степеней подвижности, и аналогичные многозвенные конструкции у робота, имеющие ту же функциональность. «Предтечей» таких роботов были носимые экзоскелеты, которые надевались либо на все тело человека, либо на отдельные его части, например, конечности. Их предназначение заключалось либо в усилении двигательных функций нормального человека, либо в компенсации частично утраченных или ослабленных двигательных функций (при инвалидности). Функция получения команд для манипулятора осталась за носимым экзоскелетом, который позволял человеку продемонстрировать антропоморфному роботу какие звенья манипулятора перемещать и на какие углы, чтобы получить нужный эффект воздействия.

В условиях лабораторного эксперимента можно изучать альтернативные виды интерфейсов, если заменить механическое устройство захвата движения его аналогами (захват на основе световых или магнитных датчиков, микрогирроскопических устройств, устройств видеозахвата и дальнометрии и др.), а вместо реального робота управлять его виртуальной моделью, в точности имитирующей реакцию на движения рук человека через выбранную систему захвата.

Следующим шагом к построению диалога с роботом может быть попытка реализовать функции восприятия, что является прологом к построению моделей, отражающих способности к обучению. Функции восприятия визуальной картины (через систему технического зрения), идентификации движущихся объектов и расстояний до них (инструменты дальнометрии), получение информации о параметрах местоположения позволяют расширить возможности ЧО по визуальной контролю окружения робота, то есть создаются условия формирования визуальной обратной связи для контроля результативности действий.

Сегодня разработаны методы «обучения робота показом движения», когда серией демонстрации правильного выполнения двигательного акта в память робота можно занести «эталонные» движения конкретных типов, чтобы потом в подходящей обстановке их актуализировать, переходя, по существу, в режим супервизорного управления [20, 21].

На схеме (рис. 4) показаны новые виды отношений физически существующих и синтезированных в цифровой форме объектов, размещаемых в виртуальном окружении.

Это вносит новые нюансы вербального описания понятия «рабочая среда». В новом толковании рабочая среда может быть реально существующей физически или виртуальной.

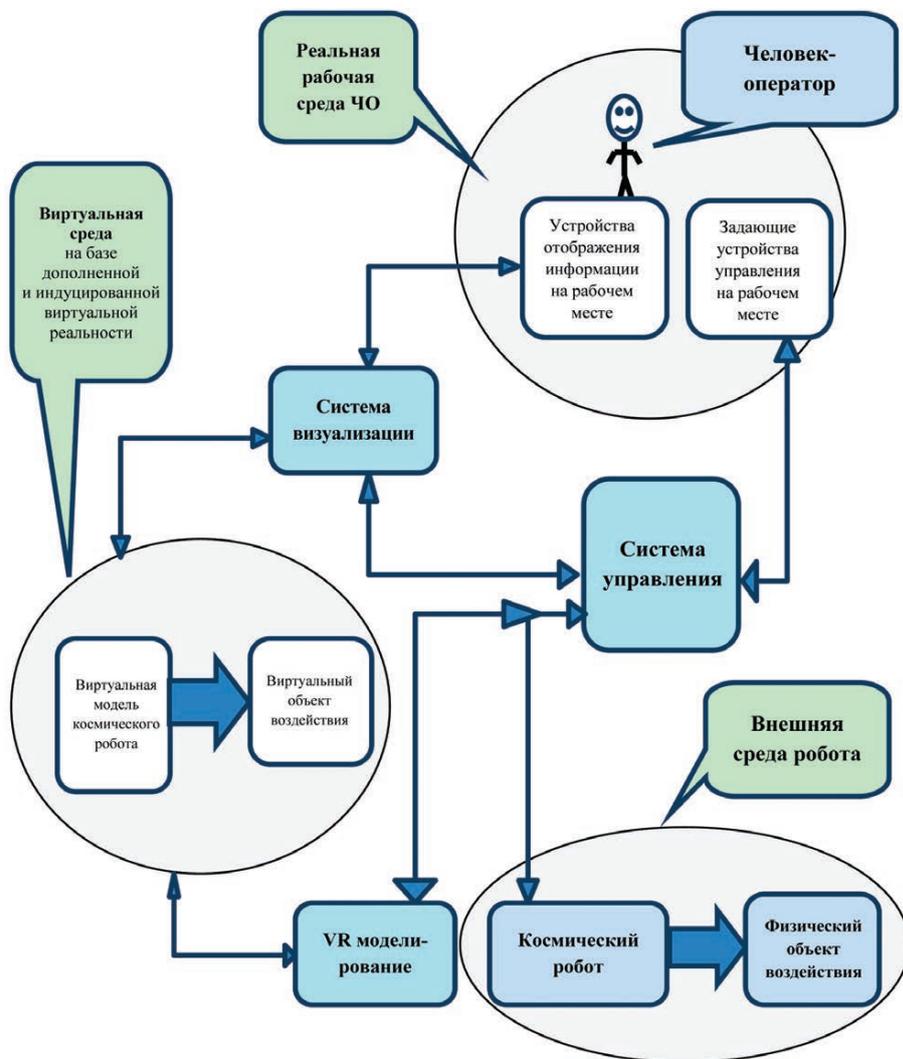


Рис. 4. Принципы использования технологий дополненной и индуцированной реальности при дистанционном управлении космическим роботом

Онтология применения виртуальных сред может рассматриваться с точки зрения реализации возможности «погружения» ЧО в искусственную среду для взаимодействия с удаленным объектом, используя «виртуальные двойники» для управляемого робота и объекта воздействия в виртуальном интерактивном окружении.

При этом переходе изменяются отношения «человек–робот–объект воздействия», так как желаемый эффект управления роботом достигается интерактивным взаимодействием с его виртуальной моделью. Такая синхронизация обеспечивается специальными программно-информационными

средствами, и в этом собственно и заключен принцип применения дополненной и индуцированной реальности для управления реальными системами. Чтобы обеспечить такие сложные отношения, могут потребоваться развитые программно-аппаратные средства имитационного моделирования и 3D-визуализации.

### **Оснащение лабораторно-учебной базы компьютерными комплексами моделирования и визуализации для прототипирования эргономических решений**

Сегодня исследователи человеческого фактора в сложных системах отчетливо понимают роль методов и средств моделирования и визуализации функционирования сложных систем. Это позволяет изучать надежность деятельности оператора в лабораторных условиях, варьируя в широком диапазоне условия труда, эргономику рабочего места, тип человеко-машинного интерфейса.

В числе основных отличий такого подхода с использованием технологий виртуальной реальности можно указать применение:

1) способа построения интерактивного контура управления для динамического объекта с использованием реальных и виртуальных элементов управления;

2) обратной связи с построением синтезированной визуальной картины рабочей среды для улучшения СтО ЧО.

Разработкой ИМК в нашей стране занимается большое число организаций [22–24]. Рассмотрим одну из типовых разработок.

Разработанная ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (г. Москва) схема ИМК для моделирования деятельности космонавтов при управлении космическим роботом показана на рис. 5.

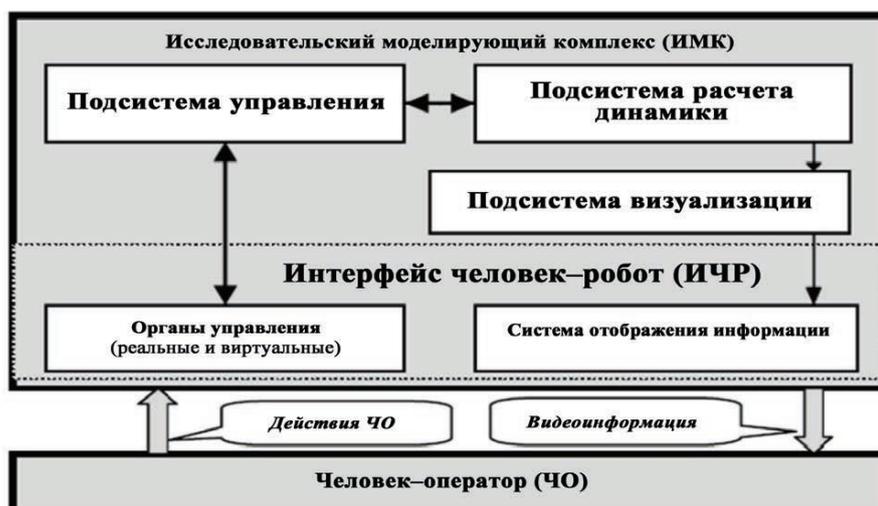


Рис. 5. Общая схема ИМК для построения виртуального окружения

В базовой конфигурации ИМК состоит из нескольких подсистем [22]:

- моделирования виртуальной сцены;
- управления;
- динамики;
- визуализации.

Кратко опишем взаимодействие этих подсистем в составе ИМК.

– «Виртуальная сцена» создается в системе 3D-моделирования Autodesk 3DS MAX:

1) из стандартных примитивов (прямоугольных параллелепипедов, сфер, конусов и т.д.), доступных в системе 3DS MAX;

2) из добавленных в эту систему специальных объектов (колес, двигателей, систем частиц и т.д.), содержащих динамические параметры (массы, тензоры инерции и т.д.).

– «Система моделирования» с добавленными объектами образует «конструктор виртуальной сцены». «Подсистема управления» состоит из виртуальных (или реальных) пультов управления и функциональных схем для расчета управляющих сигналов. Она получает на вход «оцифрованные воздействия» ЧО на виртуальные элементы управления и формирует на выходе управляющие сигналы, которые передаются в «подсистему динамики».

– «Подсистема расчета динамики» загружает виртуальную модель и на основе динамических параметров ее объектов рассчитывает новые положения и ориентации этих объектов через промежуток времени моделирования. Эти данные передаются в «подсистему визуализации», которая производит синтез виртуальной сцены в системе отображения информации для ЧО.

### **Перспективы расширения способов взаимодействия человека и робота**

Дополнительные особенности построения онтологии можно рассматривать с точки зрения семантики описания рабочей среды и решаемых системой «человек–робот» задач. Взаимодействие между человеком и роботами следующих поколений можно себе представить как активный диалог на некотором языке, понятном и человеку, и роботу [25–27].

Для расширения возможностей диалога и ведения коммуникации в привычной для человека форме возможно применение многомодального интерфейса (рис. 6), в частности, для распознавания речевых, жестовых и управляющих других команд ЧО [28–30].

Кратко итоги вышеизложенного можно резюмировать следующим образом. Ранее с онтологической точки зрения мы провели разграничения рабочей среды на две:

- 1) в которой выполняет свои функции человек;
- 2) которая предназначена для реализации функций робота.

### Способы человекомашинного взаимодействия



Рис. 6. Способы использования многомодального интерфейса

Новым видом рабочих сред можно считать виртуальное окружение. Эта разновидность рабочей среды позволяет синтезировать для ЧО реалистичную картину, отражающую поведение активных агентов и при этом придать свойство интерактивности.

В последние годы все более востребованными становятся возможности систем виртуальной реальности, позволяющие воспроизводить в виртуальной среде объекты (их структуру, вид, поведение и взаимодействие), которые в режиме реального времени могут копировать поведение своих реальных прототипов, находящихся и функционирующих в реальной среде [31]. В этом контексте в цитируемой работе вместо термина «виртуальная реальность» часто отдается предпочтение термину «виртуальное окружение» в следующей его трактовке: «Виртуальное окружение – это технология человекомашинного взаимодействия, которая обеспечивает погружение пользователя в трехмерную интерактивную среду изучаемого или моделируемого явления или процесса и предоставляет естественный интуитивный интерфейс для взаимодействия с объектами».

Содержание понятия «обучающая среда» в случае построения виртуального окружения приобретает новые свойства. Такая среда содержит в своей основе психологический конструкт, возникающий у обучаемого в специально организованных условиях (учитывается психология обучения и поведение человека) [32–34]. Деятельность в обучающих средах активно формирует качества профессионала, которые могут быть перенесены на реальную деятельность в наиболее полном объеме. Использование таких систем в практике подготовки космонавтов показало необходимость применения специальных систем моделирования и визуализации при построении тренажеров и моделирующих стендов эргономического проектирования.

## Выводы

1. Появление новых решений в области РТС для потенциального применения в космических полетах требует своевременной разработки УСМ для космонавтов в предположении об их активном участии в процессах эргономического проектирования человекомашинных интерфейсов, и в последующих испытаниях этих средств в лабораторных условиях и в космических экспериментах. Это означает необходимость привлечения космонавтов на ранних стадиях эргономического проектирования систем взаимодействия с роботом с учетом всего спектра доступных интерфейсов, и, желательно, с наглядной демонстрацией приемов взаимодействия на компьютерных моделях.

2. Анализ возможных подходов к обучению космонавтов на начальных этапах профессионализации свидетельствует в пользу разработки УСМ по эргономике человекомашинных интерфейсов с применением онтологии предметной области, с учетом тенденций ее развития в свете расширения роли искусственного интеллекта и построения многомодальных интерфейсов, включая естественные для человека формы обмена информацией с роботами. Такие преимущества онтологии, как интеграция разнородных знаний и наглядность представления знаний, дают возможность персонализировать курс обучения, настроив его на характеристики обучаемого контингента, конкретного набора слушателей с определенным уровнем профессиональной подготовки, когда стоит задача подготовить уникального специалиста к конкретным видам испытаний сложной техники в сложных экстремальных условиях среды.

3. Предлагаемая к отражению в УСМ тема взаимодействия «человек–робот» является частью более общей проблемы распределения функций в системах «человек–машина», решением которой занимается проективная эргономика. Поэтому для преподавания эргономики построения интерфейсов представляют интерес следующие вопросы: каким образом ЧО может максимально использовать при решении поставленных перед ним задач заложенный в РТС функционал; какие предусмотрены средства интерфейса для актуализации функций робота при решении практических задач в контексте проблемы принятия решений. Именно в этом заключается своеобразие эргономики интерфейсов как научной дисциплины. Базовая методическая посылка разработки УСМ предполагает нацеленность на понимание роли человека как центрального звена сложной системы.

4. Перспективными для обеспечения взаимодействия операторов с роботами можно считать многомодальные интерфейсы, основанные на одновременной обработке разнородной информации, что позволяет учитывать особенности физической рабочей среды, в которой находится человек, включая помеховые факторы.

Данное исследование частично проводится в рамках проекта РФФИ № 16-37-60100 и бюджетной темы № 0073-2019-0005.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Спасский Б.А. Космическая робототехника. Ч. I. // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 4 (21). – С. 5–13.
- [2] Тимофеев А.Н., Шардыко И.В. Проблемы применения в космосе антропоморфных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1. – С. 37–41.
- [3] Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specification / Gruber T.R. // Knowledge Acquisitions. V. 5, № 2, 1993. pp. 199–220. <http://dx.doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
- [4] Gruber T.R. Toward. Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing / Gruber T.R. // International Journal Human-Computer Studies, 1995. – № 43 (5–6), pp. 907–928.
- [5] Митрофанова О.А., Константинова Н.С. Онтологии как системы хранения знаний // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», М., 2008. – 54 с. – Электронный ресурс. URL: <http://www.ict.edu.ru/ft/005706/68352e2-st08.pdf> (Доступ свободный, дата 2019.04.14).
- [6] Noy N.F., McGuinness D.L. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology // Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880, March 2001. URL: [http://protege.stanford.edu/publications/ontology\\_development/ontology\\_101.html](http://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology_101.html)
- [7] Боргест Н.М. Границы онтологии проектирования // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7. – № 1(23). – С. 7–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.
- [8] Боргест Н.М. Ключевые термины онтологии проектирования: обзор, анализ, обобщения // Онтология проектирования. – № 3 (9). – 2013. – С. 9–31.
- [9] Мирский Э.М. Дисциплина научная / Национальная философская энциклопедия. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://terme.ru/termin/disciplina-nauchnaja.html>
- [10] Курзанцева Л.И. Онтология – основа для построения интеллектуального человеко-машинного интерфейса для знаниеориентированных обучающих систем // «Інформаційні технологи та комп'ютерна інженерія». – 2015. – № 2. – С. 58–66.
- [11] Гаврилова Т.А. Визуализация онтологий как инструмент приобретения знаний / Т.А. Гаврилова и др. // Труды 4-го Международного семинара по прикладной семиотике, семиотическому и интеллектуальному управлению ASC/IC'99. – М., 1999. – С. 34–41.
- [12] Гаврилова Т.А. Использование онтологий в системах управления знаниями. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/use\\_ontology\\_in\\_suz.shtml](http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/use_ontology_in_suz.shtml)
- [13] Палагин А.В. Онтологические методы и средства обработки предметных знаний: монография / А.В. Палагин, С.Л. Крывый, Н.Г. Петренко. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. – 324 с.
- [14] Мунипов В.М., Зинченко В.П. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды. – М.: Логос, 2001. – 356 с.
- [15] Шупейко И.Г. Эргономическое проектирование систем «человек–компьютер–среда». – Минск: БГУИР, 2012. – 92 с.
- [16] Сергеев С.Ф. Человеческий фактор в самолетах 6-го поколения: проблемы техносимбиоза // Механика, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19. – № 12. – С. 806–811.

- [17] Тимофеев А.В. Роботы и искусственный интеллект. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
- [18] Крючков Б.И., Карпов А.А., Усов В.М. Перспективные подходы к применению сервисных роботов в области пилотируемой космонавтики // Тр. СПИИРАН, 2014, вып. 32. – С. 125–151.
- [19] Заборовский В.С., Кондратьев А.С., Мулюха В.А., Силяченко А.В., Ильяшенко А.С., Филиппов М.С. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 6 (162). – С. 23–32.
- [20] Крючков Б.И., Кулаков Ф.М., Карпов А.А., Нечаев А.И., Усов В.М., Чернакова С.Э. Включение робота-ассистента в совместную с космонавтами деятельность методом «обучения показом движений» // Труды 25-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника (ЭР-2014)», Санкт-Петербург. – Изд-во «Политехника-сервис», 2014. – С. 51–54.
- [21] Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э., Крючков Б.И., Усов В.М. Построение «тренажера-интерфейса» как способ планирования телеуправления манипуляционным роботом // Сборник «XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014», Ин-тут проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2014. – С. 3991–3997.
- [22] Михайлюк М.В., Брагин В.И. Технологии виртуальной реальности в имитационно-тренажерных комплексах подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 2(7). – С. 82–93.
- [23] Сохин И.Г., Курицын А.А., Усов В.М. Проблемы взаимодействия экипажей перспективных космических миссий с антропоморфными роботами-помощниками // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах: ЭРГО 2018. Сб. трудов. III Междунар. конф. ЭРГО 2018. Санкт-Петербург. 4–7 июля 2018 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 782–289.
- [24] Сергеев А.В., Гук М.Ю. Управление мобильным роботом космического назначения с применением виртуальной реальности // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 3(4). – С. 44–53.
- [25] Ющенко А.С. Диалоговое управление роботами с использованием нечетких моделей // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник трудов. V Междунар. научно-практич. конф. Т. 1. – М.: Физматлит, 2009. – С. 97–108.
- [26] Ющенко А.С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – № 18(12). – С. 812–819. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.18.812-819>.
- [27] Карпов А.А., Юсупов Р.М. Многомодальные интерфейсы человеко-машинного взаимодействия // Вестник Российской академии наук. – 2018. – Т. 88. – № 2. – С. 146–155.
- [28] Ронжин А.Л., Карпов А.А. Многомодальные интерфейсы: основные принципы и когнитивные аспекты // Труды СПИИРАН. – 2006. – Вып. 3. – Т. 1. – С. 300–319.
- [29] Юсупов Р.М., Крючков Б.И., Карпов А.А., Ронжин А.Л., Усов В.М. Возможности применения многомодальных интерфейсов на пилотируемом космическом комплексе для поддержания коммуникации космонавтов с мобильным роботом – помощником экипажа // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 3. – С. 23–34.

- [30] Ли И.В., Ронжин А.Л., Карпов А.А. Онтология проблемы интегрального понимания речи // Тр. СПИИРАН. – 2004. – Т. 1. – Вып. 2. – С. 194–204.
- [31] Клименко С.В., Брагута М.В. Использование систем виртуального окружения для визуализации информации в сфере управления электроэнергетическими системами // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 1–7.
- [32] Сергеев С.Ф. Виртуальные тренажеры: проблемы теории и методологии проектирования // Биотехносфера. – 2010. – № 2(8). – С. 15–20.
- [33] Сергеев С.Ф. Инженерно-психологическое проектирование сложных эрготехнических сред: методология и технологии // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики / Под ред. В.А. Бодрова, А.Л. Журавлева. – Вып. 1. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2009. – С. 429–449.
- [34] Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2009. – 432 с.

## REFERENCES

- [1] Spassky V.A. Space robotics. Part. I. // Robotics and Technical Cybernetics. – 2018. – No 4 (21). – pp. 5–13.
- [2] Timofeev A.N., Shardyko I.V. Problems of anthropomorphic robot application in space // Robotics and Technical Cybernetics. – 2013. – No 1. – pp. 37–41.
- [3] Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specification / Gruber T.R. // Knowledge Acquisitions. V. 5, No 2, 1993. pp. 199–220. <http://dx.doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
- [4] Gruber T.R. Toward. Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing / Gruber T.R. // International Journal Human-Computer Studies, 1995. – No 43 (5–6), pp. 907–928.
- [5] Mitrofanova O.A., Konstantinova N.S. Ontologies as a knowledge storage system // All-Russian competitive selection of review and analytical articles in the priority area “Information and telecommunication systems”. Moscow, 2008. – 54 p. – Electronic source. URL: <http://www.ict.edu.ru/ft/005706/68352e2-st08.pdf> (free access, date 2019.04.14).
- [6] Noy N.F., McGuinness D.L. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology // Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880, March 2001. URL: [http://protege.stanford.edu/publications/ontology development/ontology 101.html](http://protege.stanford.edu/publications/ontology%20development/ontology%20101.html)
- [7] Borgest N.M. The boundaries of design ontology // Design ontology. – 2017. – V. 7. – No 1(23). – pp. 7–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-7-33.
- [8] Borgest N.M. Key terms of design ontology: review, analysis, outcomes // Design ontology. – No 3 (9). – 2013. – pp. 9–31.
- [9] Mirskiy E.M. Scientific discipline / National Philosophical Encyclopedia. 2017. [Electronic source]. URL: <http://terme.ru/termin/disciplina-nauchnaja.html>
- [10] Kurzantseva L.I. Ontology - the basis for building an intelligent human-machine interface for knowledge-oriented learning systems // «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» [“Information technologies and computer engineering”]. – 2015. – No 2. – pp. 58–66.
- [11] Gavrilova T.A. Visualization of ontology as a means of knowledge acquisition / T.A. Gavrilova and others // Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Applied

- Semiotics, Semiotic and Intellectual Management ASC/IC'99. – Moscow, 1999. – pp. 34–41.
- [12] Gavrilova T.A. Application of ontologies in knowledge management systems. [Electronic source]. URL: [http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/use\\_ontology\\_in\\_suz.shtml](http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/use_ontology_in_suz.shtml)
- [13] Palagin A.V. Ontological methods and means of processing subject knowledge: a monograph / A.V. Palagin, S.L. Kryvy, N.G. Petrenko. – Lugansk: Publishing House of V. Dahl VNU, 2012. – p. 324.
- [14] Munipov V.M., Zinchenko V.P. Ergonomics: human centred design of hardware, software and environment. – Moscow: Logos, 2001. – p. 356.
- [15] Shupeiko I.G. Ergonomic design of “human-computer-environment” systems. – Minsk: BSUIR, 2012. – p. 92.
- [16] Sergeev S.F. The human factor in a sixth-generation airplanes: problems of techno symbiosis // Mechanics, Automation, Management. – 2018. – V. 19. – No 12. – pp. 806–811
- [17] Timofeev A.V. Robots and Artificial Intelligence. – Moscow: Nauka [Science], 1978. – p. 192.
- [18] Kryuchkov B.I., Karpov A.A., Usov V.M. Promising approaches to the use of service robots applicable to human space exploration // SPIIRAS, 2014, Issue 32. – pp. 125–151
- [19] Zaborovsky V.S., Kondratyev A.S., Milyukha V.A., Silinenko A.V., Ilyashenko A.S., Filippov M.S. Remote control of robotic systems in a series of “Contour” space experiments // Scientific and technical reports of SPbSPU. Informatics, Telecommunications, Management. – 2012. – No 6 (162). – pp. 23–32
- [20] Kryuchkov B.I., Kulakov F.M., Karpov A.A., Nechaev A.I., Usov V.M., Chernakova S.E. Collaborative activity of robotic assistants and cosmonauts using “movement demonstration” method // Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference “Extreme Robotics” (ER-2014), St. Petersburg. – “Politekhnik-service” Publ. House, 2014. – pp. 51–54
- [21] Kulakov F.M., Chernakova S.E., Kryuchkov B.I., Usov V.M. Design of the “simulator-interface” as a way of planning remote control of a manipulation robot // Proceedings of the “XII All-Russian Meeting on Management Problems of VSPU-2014”, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS. – 2014. – pp. 3991–3997.
- [22] Mikhayluk M.V., Bragin V.I. Application of virtual reality technologies in simulation complexes for cosmonaut training // Scientific journal “Manned Spaceflight”. – 2013. – No 2(7). – pp. 82–93.
- [23] Sokhin I.G., Kuritsyn A.A., Usov V.M. Issues of interaction between the crews of future space missions and anthropomorphic robotic assistants // Human factor in complex technical systems and environments: ERGO 2018. Proceedings of the III Intern. Conf. ERGO2018. St. Petersburg, July 4–7, 2018. – St. Petersburg: SPbETU “LETI”. – pp. 782–289.
- [24] Sergeev A.V., Guk M.Yu. Mobile space robot control with the use of virtual reality // Scientific journal “Manned Spaceflight”. – 2018. – No 4(29). – pp. 44–53.
- [25] Yuschenko A.S. Interactive control of robots using fuzzy models // Integrated models and soft computing in artificial intelligence: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. V. 1. – Moscow: Fizmatlit, 2009. – pp. 97–108.
- [26] Yuschenko A.S. Collaborative robotics: status and new challenges // Mechatronics, Automation, Management. – 2017. – No 18(12). – pp. 812–819. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.18.812-819>.

- [27] Karpov A.A., Yusupov R.M. Multimodal interfaces of human-machine interaction // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2018. – V. 88. – No 2. – pp. 146–155.
- [28] Ronzhin A.L., Karpov A.A. Multimodal interfaces: basic principles and cognitive aspects // SPIIRAS. – 2006. – Issue 3. – V. 1. – pp. 300–319.
- [29] Yusupov R.M., Kryuchkov I.B., Karpov A.A., Ronzhin A.L., Usov V.M. Application of multimodal interfaces aboard the manned space complex to support interaction between cosmonauts and robotic crew assistants // Scientific journal “Manned Spaceflight”. – 2013. – No 3. – pp. 23–34.
- [30] Lee I.V., Ronzhin A.L., Karpov A.A. Ontology of the problem of integrated speech understanding // SPIIRAS. – 2004. – V. 1. – Issue 2. – pp. 194–204.
- [31] Klimenko S.V., Braguta M.V. Using virtual environment systems to visualize information regarding electric power systems control. // Bulletin of ISEU. – 2008. – Issu 4. – pp. 1–7.
- [32] Sergeev S.F. Virtual simulators: problems of theory and design methodology // Biotechksfera [Biotechsphere]. – 2010. – No 2(8). – pp. 15–20.
- [33] Sergeev S.F. Engineering and psychological design of complex ergotechnical environments: methodology and technologies // Topical issues of labor psychology, engineering psychology and ergonomics / Edited by V.A. Bodrova, A.L. Zhuravlyova. – Issue 1. – Moscow: “Institute of Psychology of RAS” Publ. House, 2009. – pp. 429–449.
- [34] Sergeev S.F. Educational and professional immersive environments. – Moscow: Narodnoye obrazovanie [Public Education], 2009. – p. 432.