

## **НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОМ КОПИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ**

В.Г. Сорокин, С.В. Кудь-Сверчков, Ю.С. Чеботарев

Канд. воен. наук, доцент В.Г. Сорокин;  
космонавт-испытатель С.В. Кудь-Сверчков; Ю.С. Чеботарев  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В настоящее время только в результате проведения экспериментальных исследований с использованием антропоморфной робототехнической системы могут быть определены и обоснованы требования к характеристикам эргатической системы «космонавт–антропоморфная робототехническая система–среда», определен порядок оценки операторской деятельности космонавтов при использовании антропоморфных роботов, разработаны предложения по функциональности данной эргатической системы и способы ее применения в интересах повышения качества эксплуатации существующих и перспективных пилотируемых космических комплексов.

**Ключевые слова:** антропоморфная робототехническая система, внутрикорабельная деятельность, внекорабельная деятельность, космонавты, полетная операция, телеуправляемый копирующий режим, экспериментальные исследования.

### **Some Results of Experimentation with the Anthropomorphic Robotic System in Remote Control Master-Slave Mode.**

**V.G. Sorokin, S.V. Kud'-Sverchkov, Yu.S. Chebotarev**

At present, the requirements for the characteristics of the “cosmonaut-anthropomorphic robotic system-environment” ergatic system, the procedure for evaluating the performance of a cosmonaut-operator when using anthropomorphic robots, proposals for the functionality of this ergatic system and the ways of its application in order to increase the operational quality of existing and future manned space complexes can be determined and substantiated only as a result of carrying out experimental studies using an anthropomorphic robotic system.

**Keywords:** anthropomorphic robotic system, intra vehicular activity, extra vehicular activity, flight operation, remote control master-slave mode.

Реализация целей пилотируемой космонавтики предполагает существенное усложнение деятельности экипажей существующих и перспективных пилотируемых космических комплексов (ПКК) и увеличение объемов работ, связанных с техническим обслуживанием ПКК, выполнением трудоемких монтажно-восстановительных работ, рутинных и опасных операций. В этой

связи особый интерес представляет использование антропоморфных роботов (АР) в составе эргатической системы (ЭС) «космонавт– антропоморфный робот–среда» для поддержки деятельности экипажей в космическом полете.

В связи с этим, в феврале 2019 года в Научно-исследовательском испытательном Центре подготовки космонавтов (НИИ ЦПК) были проведены экспериментальные исследования на универсальном компьютерном стенде робототехнических систем (УКС РТС) по отработке взаимодействия космонавтов с антропоморфной робототехнической системой (АРТС) в телеуправляемом копирующем режиме.

Актуальность данной работы заключается в том, что в настоящее время только в результате проведения исследований с использованием АР могут быть определены и обоснованы требования к характеристикам ЭС «космонавт–АРТС–среда», определен порядок оценки операторской деятельности космонавтов при использовании АР, разработаны предложения по функциональности данной ЭС и способы ее применения в интересах повышения качества эксплуатации существующих и перспективных ПКК.

Исследования выполнены на УКС РТС с использованием технологического макета (ТМ-1) антропоморфного робота.

Ожидается, что практическое использование результатов экспериментальных исследований поможет сделать очередной шаг к использованию космонавтами АРТС при эксплуатации существующих и перспективных ПКК.

Результаты данных исследований использовались для обеспечения процесса подготовки космонавтов-испытателей А.А. Скворцова и С.Н. Рыжикова к проведению космического эксперимента «Испытатель» с использованием АР «FEDOR».

### **Определение состава экспериментальных операций, выполняемых космонавтами при моделировании деятельности с использованием антропоморфного робота в телеуправляемом копирующем режиме**

Состав экспериментальных операций (ЭО) для моделирования их выполнения с помощью технологического макета антропоморфного робота в телеуправляемом копирующем режиме был определен в НИИ ЦПК на основе анализа внекорабельной и внутрикорабельной деятельности (ВКД и ВнуКД), выполняемой космонавтами в космическом полете.

Так, например, определение состава ЭО для моделирования их выполнения с помощью технологического макета антропоморфного робота осуществлено на основе анализа ВнуКД, проведенного в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 1.

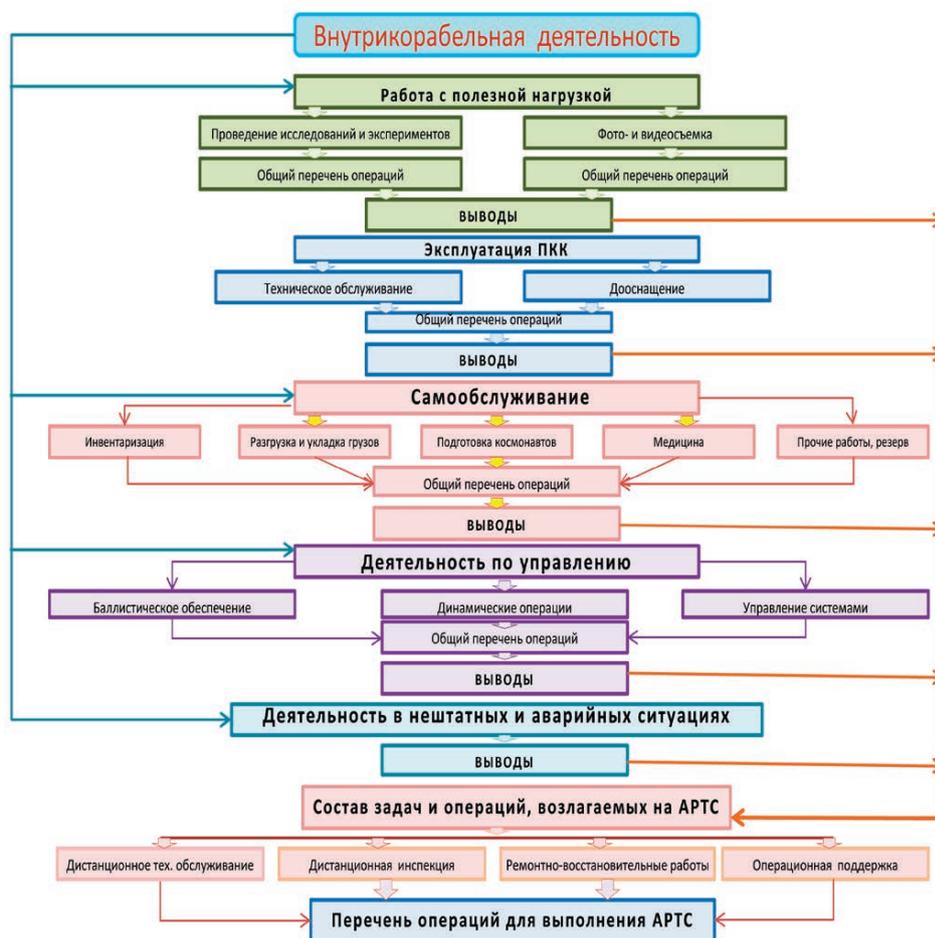


Рис. 1. Алгоритм для определения состава экспериментальных операций для моделирования их выполнения с помощью технологического макета антропоморфного робота

В результате проведенного анализа выполнения ВКД и ВнутКД и с учетом возможностей технологического макета АР определен следующий состав ЭО для моделирования их выполнения в процессе исследований:

- переключение тумблеров на пульте;
- выдача разовых команд на пульте;
- стыковка и расстыковка низкочастотных разъемов;
- стыковка и расстыковка высокочастотных разъемов;
- расфиксация и фиксация карабинов на поручнях;
- раскрытие и закрытие магнитных замков;
- откручивание и закручивание резьбовых соединений;
- монтаж и демонтаж замков на поручнях.

Вместе с тем, исходя из технических возможностей ТМ-1, на данном этапе было решено ограничиться выполнением трех ЭО:

- расфиксация и фиксация карабинов на поручнях;
- выдача разовых команд на пульте;
- переключение тумблеров на пульте.

Данные ЭО выполнялись поэлементно:

№ 1 – расфиксация и снятие карабина с поручня;

№ 2 – фиксация карабина на поручень;

№ 3 – нажатие на кнопку на пульте;

№ 4 – включение тумблера на пульте;

№ 5 – выключение тумблера на пульте.

### **Порядок проведения и результаты экспериментальных исследований**

Одной из основных задач проведения исследований являлась эргономическая экспертиза ЭС «космонавт–антропоморфный робот–среда» для оценки ее функциональных возможностей, степени реализации эргономических требований и выработки предложений по оптимизации этой системы.

Для проведения исследований были разработаны проекты программы и методики проведения экспериментов.

Основным методом исследований была определена экспертная оценка качества выполнения космонавтами (операторами) элементов ЭО с помощью телеуправляемой АРТС и эргономических характеристик ЭС «космонавт–антропоморфный робот–среда». Оценивание выполнялось операторами АРТС и экспертами бригады обеспечения экспериментальных исследований (БОЭИ) в соответствии со специально разработанными измерительными процедурами.

Группа операторов АРТС формировалась на добровольной основе из космонавтов-испытателей и инструкторского состава, имеющих опыт выполнения типовых полетных операций.

На тренировочном цикле каждый оператор выполнил не менее 30 элементов ЭО:

- пять элементов ЭО каждого типа в режиме тренировки без использования очков виртуальной реальности по три раза (всего 15) (рис. 4);
- пять элементов ЭО каждого типа в режиме тренировки с использованием очков виртуальной реальности по три раза (всего 15) (рис. 2, 4).

На зачетном цикле каждый оператор выполнил пять элементов ЭО каждого типа по три раза (всего 15) с использованием очков виртуальной реальности, не считая операций, выполненных с ошибками (которые не считались зачетными) (рис. 3, 4).

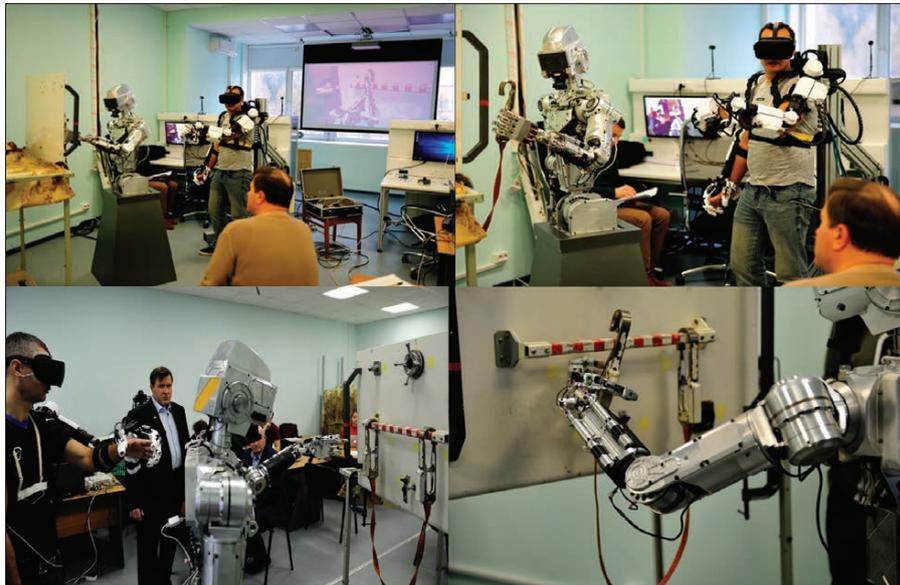


Рис. 2. Тренировочные действия для расфиксации и фиксации карабина с очками виртуальной реальности



Рис. 3. Зачетные действия для расфиксации и фиксации карабина с очками виртуальной реальности



Рис. 4. Тренировочные и зачетные действия для включения (выключения) тумблера

По результатам проведения исследований было установлено:

1) При выполнении тренировочных действий без очков виртуальной реальности все операторы допускали не критические ошибки, связанные с некоординированными движениями, но все элементы ЭО были выполнены без существенных замечаний по взаимодействию с АРТС в соответствии с составом и содержанием исследований, изложенных в проектах программы и методики.

2) При выполнении тренировочных действий с очками виртуальной реальности все операторы допускали не критические ошибки, связанные с неточным определением расстояния до объектов действий, но все элементы ЭО были выполнены без существенных замечаний по взаимодействию с АРТС в соответствии с составом и содержанием исследований, изложенных в проектах программы и методики.

3) При выполнении зачетных действий с очками виртуальной реальности операторы, в основном, работали с незначительными ошибками, все элементы ЭО были выполнены в соответствии с составом и содержанием исследований, изложенных в проектах программы и методики, причем, значительно быстрее, чем в тренировочном режиме.

Для оценки показателей были специально разработаны следующие измерительные процедуры:

*1) «Оценка качества выполнения элемента ЭО по безошибочности»*

Членами БОЭИ оценивалось качество выполнения элемента ЭО с помощью АРТС на предмет наличия ошибок. Оценивание осуществлялось в соответствии с принятыми нормами деятельности космонавтов при выполнении данной полетной операции (элемента полетной операции) без использования АРТС. При этом использовались следующие оценки: «Операция выполнена без ошибок», «Операция выполнена с некритическими ошибками», «Операция не выполнена или имеются критические ошибки, которые не позволяют считать операцию выполненной».

*2) «Оценка качества выполнения элемента ЭО по времени выполнения»*

Фиксировалось время выполнения оператором элемента ЭО. Отсчет времени шел от начала выполнения и заканчивался при завершении при условии, что элемент ЭО выполнен без критических ошибок. В случаях, если элемент ЭО был выполнен с критическими ошибками или превышением лимита отведенного времени, он считался не выполненным и время не регистрировалось.

*3) «Оценка управляемости АРТС по адекватности управляющих воздействий оператора и ответных реакций АРТС (динамическое подобие)»*

Оценка управляемости оценивалась как экспертами, так и оператором. При этом эксперты в своих оценках опирались на визуальный контроль управления оператором манипуляторами и телекамерами с помощью задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ), сравнивая положение рук и головы человека-оператора с ответными реакциями манипуляторов АРТС. Оценка оператором управляемости АРТС основывалась на послеоперационном балльном тестировании с использованием теста Купера-Харпера.

*4) «Оценка удобства обслуживания АРТС»*

Экспертами оценивалось удобство надевания ЗУКТ на оператора, качество подгонки его под антропометрические особенности оператора, выполнения калибровок и других действий, связанных с подготовкой ЗУКТ к работе. Экспертные качественные оценки «Достаточно комфортно», «Дискомфорт удовлетворительный», «Очень неудобно» заносятся в специально разработанную форму.

*5) «Оценка надежности и безопасности применения АРТС»*

В ходе проведения исследований фиксировались все отказы и сбои в работе АРТС, которые классифицировались на «некритичные», «имеющие незначительные последствия», «имеющие существенные последствия», «аварийные». Затем с использованием математического аппарата определялась надежность, безопасность использования АРТС и интенсивность критических отказов.

*6) «Оценка антропометрических данных оператора»*

Измерялись антропометрические данные оператора согласно специально разработанной форме.

*7) «Оценка психофизиологических состояний оператора АРТС»*

Целью оценки психологического состояния оператора являлось изучение основных условий и критериев эффективной деятельности операторов в рамках работы с АРТС: психологические факторы, влияющие на работу оператора; исследование влияния темперамента и мотивации оператора на качество выполняемой деятельности.

В ходе психологического исследования психологами решались следующие задачи: определение преобладающего типа реагирования в процессе деятельности по принципу возбуждения или торможения (определение темперамента), а также определение ведущей мотивационной направленности личности; анализ репортажа, проводимого оператором во время работы с АРТС; проведение динамического наблюдения за деятельностью оператора; определение психологических факторов, влияющих на работу оператора с АРТС.

Ведущая мотивация оператора оценивалась в результате предоперационного теста-опросника А. Мехрабиана, а также экспертами в ходе выполнения экспериментов. Напряженность работы оператора оценивалась по результатам объективного контроля физиологических параметров, считываемых с датчиков медицинского пояса. По этим параметрам с помощью специального алгоритма рассчитывался индекс напряженности с привязкой ко времени работы.

Сбор медицинских данных операторов проводился в три этапа.

На первом этапе (перед надеванием ЗУКТ и проведением цикла экспериментов) производилось снятие фоновых медицинских данных оператора: ЭКГ, АД, ЧСС, ЧД, ТТ.

На втором этапе (во время проведения экспериментов) производилось снятие текущих медицинских данных оператора: ЭКГ, АД, ЧСС, ЧД, ТТ.

На третьем этапе (после окончания цикла экспериментов) производилось снятие фоновых медицинских данных оператора: ЭКГ, АД, ЧСС, ЧД, ТТ.

*8) «Субъективные оценки ощущений оператора АРТС»*

После завершения цикла исследований оператор оценивал свои ощущения при управлении АРТС с заполнением специально разработанной формы. Оценке подлежали удобство работы, зрительные и силомоментные ощущения при выполнении элементов ЭО, эффект присутствия оператора в рабочей среде, степень напряженности работы. Кроме того, выполнялась оценка влияния на работу оператора психологических факторов (по методике последовательной динамической оценки).

Ниже представлены основные результаты исследований.

1) Анализ результатов оценки качества выполнения операций по безошибочности (рис. 5, 6).

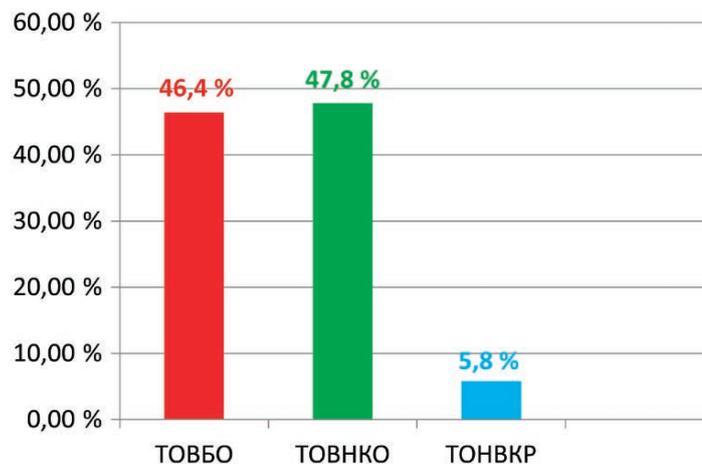


Рис. 5. Общие результаты выполнения тренировочных операций всеми операторами

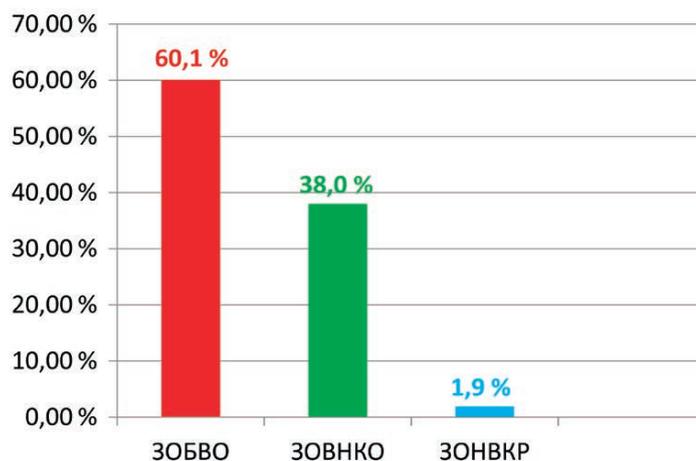


Рис. 6. Общие результаты выполнения зачетных операций всеми операторами

Обозначения для рисунков 5, 6:

- тренировочная операция выполнена без ошибок (ТОВБО);
- тренировочная операция выполнена с некритическими ошибками (ТОВНКО);
- тренировочная операция не выполнена или имеются критические ошибки, которые не позволяют считать операцию выполненной (ТОНВКР);
- зачетная операция выполнена без ошибок (ЗОВБО);
- зачетная операция выполнена с некритическими ошибками (ЗОВНКО);

– зачетная операция не выполнена или имеются критические ошибки, которые не позволяют считать операцию выполненной (ЗОНВКР).

Анализ графиков на рисунках 5, 6 показывает повышение качества работы операторов АРТС. Это определяется общей тенденцией на увеличение числа операций, выполненных без ошибок или с некритическими ошибками, и уменьшением числа невыполненных операций в сравнении с качеством работы операторов на тренировочном и зачетном циклах.

2) Анализ результатов оценки управляемости АРТС по адекватности управляющих воздействий оператора и ответных реакций АРТС.

Управляемость АРТС оценивалась по результатам выполнения операций на основе четырехбалльной шкалы значений данного показателя, определенных в проекте разработанной методики: отличная, хорошая, удовлетворительная, неудовлетворительная.

Результаты выполнения операций по показателю «Управляемость АРТС» для каждого из операторов представлены на рисунке 7.

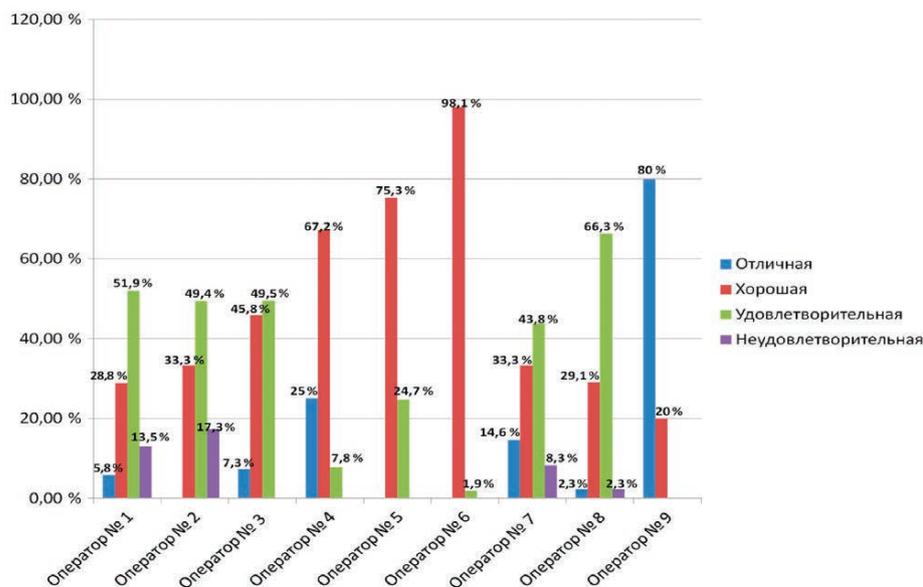


Рис. 7. Результаты выполнения операций по показателю «Управляемость АРТС» для каждого из операторов

Анализ полученных результатов (рис. 7) показывает, что управляемость АРТС оценивалась операторами и экспертами, в основном, как хорошая и удовлетворительная.

Оценка управляемости АРТС каждым оператором основывается на послеоперационном балльном тестировании с использованием теста Купера-Харпера (рис. 8).

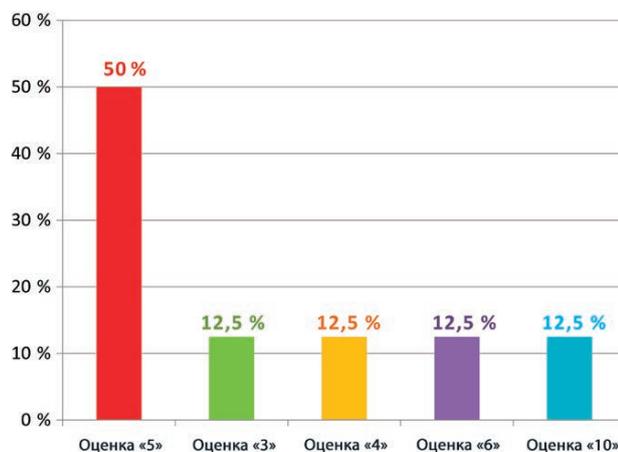


Рис. 8. Результаты послеоперационного балльного тестирования с использованием теста Купера-Харпера каждым из операторов

Результаты послеоперационного балльного тестирования с использованием теста Купера-Харпера каждым из операторов показали, что 50 % операторов оценили качество управления как адекватное (оценка «5»), и по 12,5 % как несущественные, но раздражающие недостатки (оценка «4»), очень нежелательные, но приемлемые недостатки (оценка «6»), неприемлемые недостатки (оценка «10»).

3) Результаты экспертного оценивания по субъективным ощущениям при выполнении операций операторами АРТС представлены на рисунках 9–15.

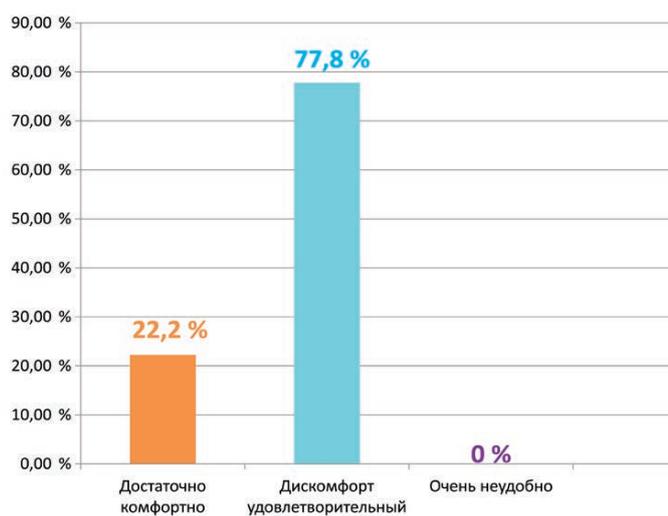


Рис. 9. Общие результаты субъективных ощущений операторов АРТС применительно к удобству работы с ЗУКТ

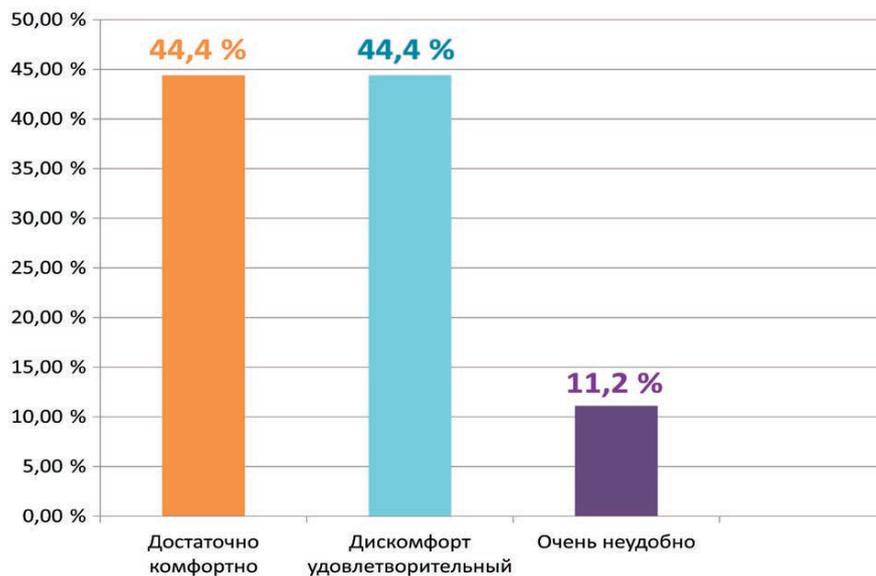


Рис. 10. Общие результаты субъективных ощущений операторов АРТС применительно к удобству работы в очках виртуальной реальности

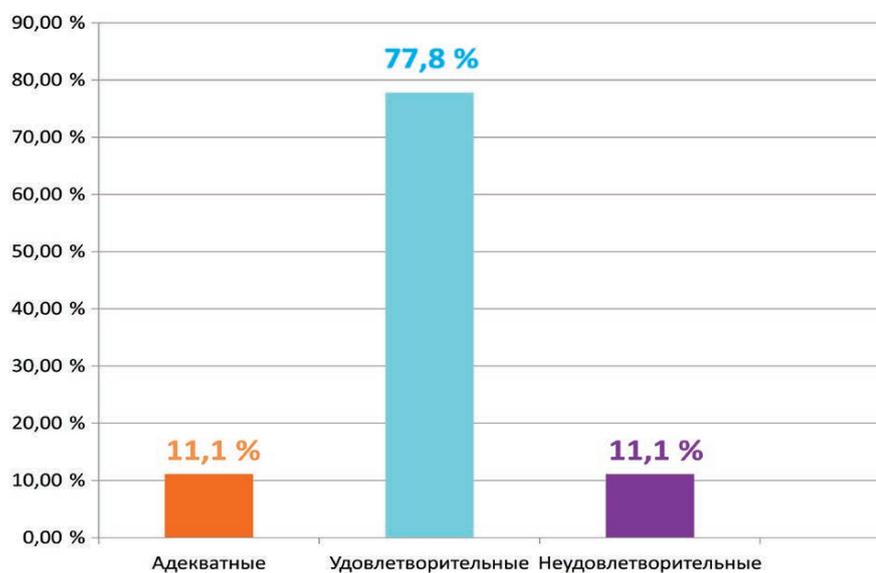


Рис. 11. Общие результаты субъективных зрительных ощущений операторов АРТС

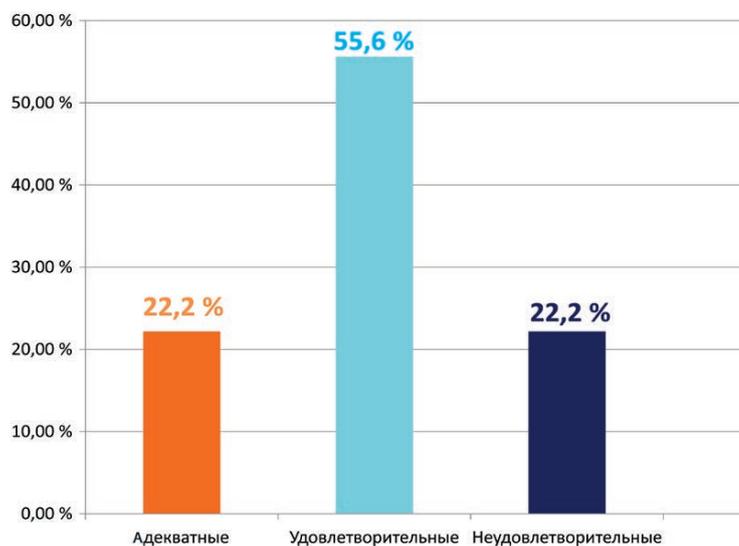


Рис. 12. Общие результаты субъективных силомоментных ощущений операторов АРТС

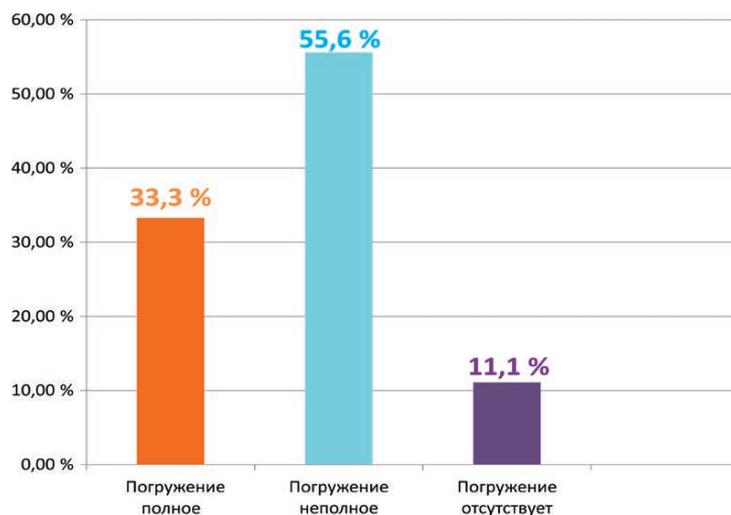


Рис. 13. Общие результаты субъективных ощущений операторов АРТС применительно к эффекту присутствия в рабочей среде

Анализ результатов оценки по субъективным ощущениям операторов АРТС, полученных экспертным методом (рис. 9–14), показал возможность определения удобства работы с ЗУКТ и в очках виртуальной реальности, зрительных и силомоментных ощущений, эффекта присутствия в рабочей среде и ощущения напряженности при выполнении заданий.

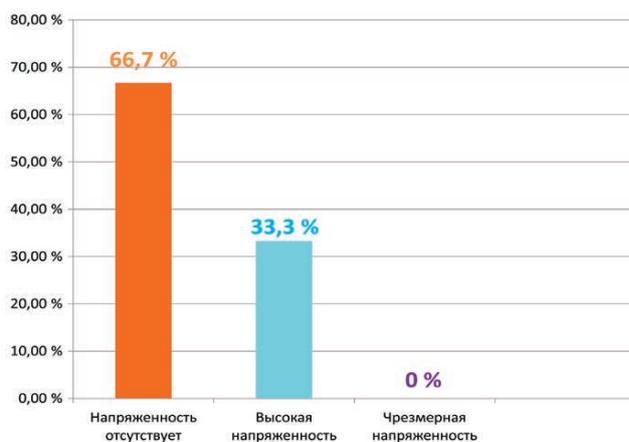


Рис. 14. Общие результаты субъективных ощущений напряженности при выполнении заданий операторами АРТС

Кроме того, анализ общих результатов позволил получить интегральные оценки субъективных ощущений (СО) операторов АРТС применительно ко всем показателям (рис. 15).

Анализ диаграммы (рис. 15) показывает, что 90,7 % СО операторов АРТС имеют положительную и удовлетворительную направленность выполнения операций с использованием АРТС.

Вместе с тем, в процессе выполнения операций операторами АРТС был выявлен ряд недостатков: по удобству работы с ЗУКТ; по удобству работы в очках виртуальной реальности; по зрительным ощущениям; по силомоментным ощущениям; по эффекту присутствия в рабочей среде; по ощущению напряженности при выполнении заданий.

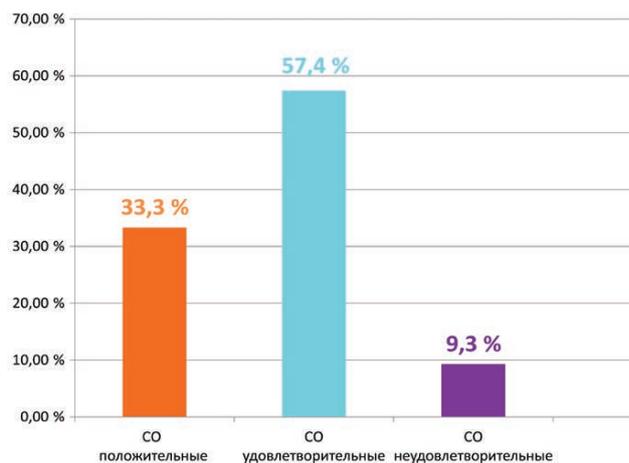


Рис. 15. Диаграмма интегральных оценок СО операторов АРТС применительно ко всем показателям

Исключение в перспективе выявленных недостатков позволит полностью устранить неудовлетворительные и повысить положительные СО.

### **Выводы**

По итогам проведения исследований с АР в телеуправляемом копирующем режиме получены некоторые новые результаты по поддержке деятельности космонавтов с использованием АРТС в ходе выполнения длительного (межпланетного) космического полета.

1) Уточнен предварительный перечень потенциальных операций космической деятельности, которые могут в перспективе выполняться с помощью телеуправляемой АРТС.

2) Разработаны проекты программы и методики экспериментальных исследований в интересах оценивания взаимодействия космонавта с АРТС в телеуправляемом копирующем режиме и проведена их экспериментальная отработка.

3) В процессе выполнения операций операторами АРТС был выявлен ряд недостатков АРТС, которые были классифицированы: по удобству работы с ЗУКТ; по удобству работы в шлеме виртуальной реальности; по зрительным ощущениям; по силомоментным ощущениям; по эффекту присутствия в рабочей среде; по ощущению напряженности при выполнении заданий.

4) Анализ проведенных исследований показал, что полученные результаты могут являться инструментом: для разработки методик подготовки космонавтов (наземных операторов); для планирования направлений исследований для совершенствования АРТС космического назначения.

5) С использованием результатов исследований в НИИ ЦПК была проведена подготовка космонавтов-испытателей А.А. Скворцова и С.Н. Рыжикова для проведения космического эксперимента «Испытатель» с использованием АР «FEDOR» в космическом полете, который был успешно выполнен.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Эргономические проблемы создания и применения антропоморфных роботопомощников экипажей перспективных космических миссий / Лончаков Ю.В., Сиволап В.А., Сохин И.Г. // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб., 2015. – С. 191–199.
- [2] Планирование действий робота в экстремальных ситуациях на основе оценки поведенческих признаков / Ким Н.В., Бодунков Н.Е., Лебедев А.В. // Робототехника и техническая кибернетика. – № 1(2). – 2014.
- [3] Перспективные подходы к применению сервисных роботов в области пилотируемой космонавтики / Крючков Б.И., Карпов А.А., Усов В.М. // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 32.
- [4] Включение робота-ассистента в совместную с космонавтами деятельность методом «обучения показом движения» / Крючков Б.И., Кулаков Ф.М., Карпов А.А., Нечаев А.И., Усов В.М., Чернакова С.Э. // Робототехника и техническая кибернетика. – № 2(3). – 2014.

- [5] Крючков Б.И., Усов В.М. Антропоцентрический подход в организации совместной деятельности космонавтов ПКК и робота-помощника андроидного типа. // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 3(5).
- [6] Применение антропоморфных робототехнических систем для поддержки деятельности экипажей перспективных пилотируемых комплексов / Сорокин В.Г., Сохин И.Г., Крючков Б.И. // Тезисы докладов 8 Международного аэрокосмического конгресса. – М., 2015. – С. 400–405.
- [7] 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.
- [8] Сорокин В.Г., Сохин И.Г. Системный подход к обоснованию эргономических требований к роботу-помощнику экипажа пилотируемого космического комплекса // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 1(18). – С. 89–98.
- [9] Сычков В.Б. Метод оценки эффективности копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 179–201.

## REFERENCES

- [1] Ergonomic issues of creating and using humanoid robots - crew assistants in future space exploration. / Yu.V. Lonchakov, V.A. Sivolap, I.G. Sokhin // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”. – St.-Petersburg, 2015. – pp. 191–199.
- [2] Robot action planning in emergency situations based on the assessment of the behavioral signs / N.V. Kim, N.E. Bodunkov, A.V. Lebedev // Robotics and Technical Cybernetics. – No 1(2). – 2014.
- [3] Long-term view on the use of service robots in manned space exploration / B.I. Kruchkov, A.A. Karpov, V.M. Usov // Proceedings of SPIIRAS. – 2014. – Issue. 32.
- [4] A way of interaction of a robot-assistant in joint activities with cosmonauts by “teaching by showing” method. / B.I. Kruchkov, F.M. Kulakov, A.A. Karpov, A.I. Nechaev, V.M. Usov, S.E. Chernakova // Robotics and Technical Cybernetics. – No 2(3). – 2014.
- [5] B.I. Kruchkov, V.M. Usov. Anthropocentric approach to the organization of joint activity of cosmonauts and an android-type robotic assistant aboard a manned space complex. // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2012. – No 3(5).
- [6] Application of anthropomorphic robotic assistants to support a crew inside the modules of future space complexes / V.G. Sorokin., I.G. Sokhin, B.I. Kruchkov // Abstracts of the 8th International Aerospace Congress. – Moscow, 2015. – pp. 400–405.
- [7] V.G. Sorokin, I.G. Sokhin. Feasible application of anthropomorphic robotic assistants to support a crew inside the modules of future space complexes // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2015. – No 4(17). – pp. 71–79.
- [8] V.G. Sorokin, I.G. Sokhin. System approach to the substantiation of ergonomic requirements for the robotic assistant of a crew aboard manned space complexes // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2016. – No 1(18). – pp. 89–98.
- [9] V.B. Sychkov. Effectiveness Evaluating Method of Anthropomorphic Robot Manipulators Copying Control // Systems of control, communication and security. – 2019. – No 3. – pp. 179–201.