

На правах рукописи



ЮРЧЕНКО Екатерина Сергеевна

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ИМИТАТОРА УНИВЕРСАЛЬНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА
КОСМОНАВТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность – «2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:	Курицын Андрей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, главный специалист ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», профессор кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ
Официальные оппоненты:	Пичугин Сергей Борисович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва» Кузьмичев Александр Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ)
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Защита диссертации состоится «30» декабря 2025 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте МАИ по адресу: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186153

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направить по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 Учёный совет МАИ.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.327.09

кандидат технических наук



Д.Ю. Стрелец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке технологии создания имитатора универсального рабочего места (УРМ) космонавта для решения задач визуально-инструментальных наблюдений (ВИН) с борта существующих и перспективных пилотируемых космических комплексов (ПКК) путем разработки методических основ проектирования компьютерного УРМ с использованием современных информационных технологий. Использование наземного имитатора УРМ ВИН позволит повысить качество подготовки космонавтов к выполнению геофизических исследований методами ВИН на борту ПКК, оценить деятельность космонавта на имитаторе УРМ при формировании навыков проведения ВИН с борта перспективных ПКК, разработать эргономические требования к модулям Российской орбитальной станции (РОС) с учетом опыта эксплуатации космонавтами РС МКС, разработать предложения по развитию перспективных средств и технологий в части отбора, подготовки и реабилитации космонавтов для реализации российских пилотируемых программ до 2040 года.

Объект исследования: программа выполнения космонавтами целевых работ на борту ПКК в части проведения геофизических исследований и мониторинга Земли методами ВИН.

Предмет исследования: процесс выполнения космонавтами геофизических исследований и мониторинга Земли методами ВИН с борта ПКК.

Актуальность работы объясняется следующим.

Концепция российской пилотируемой космонавтики предусматривает создание перспективных пилотируемых космических комплексов: Российская орбитальная станция (РОС) и пилотируемые аппараты для исследования Луны. Одним из основных направлений научных экспериментов на борту перспективных ПКК является выполнение геофизических исследований методами визуально-инструментальных наблюдений.

Важнейшей задачей создания РОС определено исследование полярных орбит, Арктики и Северного морского пути, в том числе обследование их акватории и территории, изучение ресурсного потенциала для решения народно-хозяйственных, оборонных, исследовательских задач и отработки технологий межпланетных полётов.

Одной из задач экипажей пилотируемых экспедиций лунных миссий является проведение тематической геологической, геохимической и геофизической съёмки Луны с необходимым крупномасштабным разрешением в районе места посадки лунного модуля.

Важной составной частью пилотируемого космического комплекса в соответствии с Положением о создании космической техники (РК-11-КТ) и схемой деления является СПК (средства подготовки космонавтов). СПК предназначены не только для подготовки космонавтов с целью обеспечения необходимого качества выполнения программы полета, но и для имитации деятельности космонавтов в полете с целью проектирования полетного рабочего места космонавта.

Для проведения операций и экспериментов в процессе выполнения ВИН потребуется наличие подготовленных операторов, что обуславливает необходимость углубленного формирования навыков деятельности у космонавтов по планируемым направлениям научных исследований. Существующие в настоящее время информационные технологии и системы генерации изображений позволяют имитировать наблюдаемую поверхность с высоты до 400 км с разрешением, адекватным человеческому глазу. Также отработка задач ВИН на Земле с использованием имитатора позволяет определить требования к рабочему месту космонавта на борту создаваемых ПКК.

Таким образом, основные проблемные вопросы ВИН:

- создание перспективной РОС, одной из основных целей которой будет исследование поверхности Земли;
- при выполнении мониторинга Земли с борта РС МКС, космонавты испытывают трудности с поиском и обнаружением объектов наблюдения, особенно в первом космическом полете;
- на выработку навыков ориентирования для выполнения качественной работы на борту

уходит порядка 2-3 месяцев, что очень много, учитывая длительность их экспедиции 4-6 месяцев.

Целью работы является разработка технологии создания имитатора универсального рабочего места для решения задач ВИН. Использование имитатора УРМ ВИН позволит повысить качество деятельности космонавтов на борту существующих и перспективных ПКК в части проведения геофизических исследований и мониторинга земной поверхности и лунной поверхности методами ВИН.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **основные задачи**:

- 1) Анализ визуальных условий выполнения космонавтами задач мониторинга поверхности с борта ПКК методами ВИН;
- 2) Разработка концептуальной модели процесса выполнения космонавтами мониторинга наблюдаемой поверхности с борта существующих и перспективных ПКК методами ВИН;
- 3) Разработка цифровой модели визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта существующих и перспективных ПКК;
- 4) Создание структуры и составных частей имитатора универсального рабочего места для моделирования процесса проведения ВИН космонавтами с борта перспективных ПКК;
- 5) Разработка показателей оценки качества и эффективности имитатора УРМ ВИН;
- 6) Разработка методики оценки операторской деятельности (ООД) на имитаторе универсального рабочего места при моделировании процесса проведения ВИН с борта существующих и перспективных ПКК.

Научная новизна диссертационного исследования:

Разрабатываются методические основы проектирования компьютерного имитатора УРМ для отработки космонавтами задач в области геофизических исследований и мониторинга земной и лунной поверхностей с борта существующих и перспективных ПКК методами ВИН, которые включают в себя:

- концептуальная модель предметной области процесса выполнения космонавтами мониторинга наблюдаемой поверхности с борта существующих и перспективных ПКК методами ВИН;
- структура и требуемые характеристики цифровой модели визуальной обстановки (ЦВМ) наблюдаемой поверхности с борта существующих и перспективных ПКК (логическая модель предметной области);
- структура имитатора УРМ для формирования навыков и оценки качества проведения ВИН космонавтами с борта существующих и перспективных ПКК (физическая модель), которая отличается использованием современных компьютерных технологий;
- показатели оценки качества и эффективности имитатора УРМ ВИН;
- методика оценки операторской деятельности (ООД) космонавта на имитаторе УРМ при формировании навыков проведения ВИН с борта перспективных ПКК.

Методология и методы исследования. Для решения диссертационных задач был задействован комплексный подход, включающий анализ исторического опыта полетов экипажей ПКК, теоретико-методологический анализ литературы, экспертные оценки, а также специфические методы: проектирования компьютерных систем, математического моделирования и статистики, оценки операторской деятельности, генерации изображений (метод тайлов, метод Гильберта, позиционирование по трекерам).

Методологическую основу исследования составили фундаментальные труды отечественных (Акулова О.А., Боднера В.А., Бранца В.Н., Вентцель Е.С., Грешилова А.А., Дегтярёва Ю.И., Демина Л.С., Егорова А.И., Зинченко В.П., Жука Е.И., Климука П.И., Крючкова Б.И., Кубасова В.Н., Курицына А.А., Лысенко Л.Н., Любинского В.Е., Микрина Е.А., Наумова Б.А., Ногина В.Д., Новикова А.М., Подиновского В.В., Советова Б.Я., Соловьёва В.А., Сорокина И.В., Туманова А.В., Цехановского В.В., Шукшунов В.Е., Ярополова В.И.) и зарубежных (Russel L. Ackoff, J.G. Kemeny, J.L. Snell, G.L. Tompson, Gavriel Salvendy, Maurice W. Sasieni) ученых в

сфере управления космическими полетами, подготовки космонавтов, системного анализа, информационного управления.

Положения, выносимые на защиту:

- 1 Концептуальная модель процесса выполнения космонавтами мониторинга наблюдаемой поверхности с борта существующих и перспективных ПКК методами ВИН;
- 2 Структура и требуемые характеристики цифровой модели визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта существующих и перспективных ПКК;
- 3 Структура имитатора УРМ для формирования навыков и оценки качества проведения ВИН космонавтами с борта существующих и перспективных ПКК;
- 4 Результаты оценки качества и эффективности имитатора УРМ ВИН;
- 5 Методика оценки операторской деятельности на имитаторе УРМ ВИН.

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексом подходов: применением апробированных теоретических концепций и методов, анализом результатов полетов экипажей МКС с первой по 69-ю экспедицию, разработкой и внедрением методик экспериментальных исследований, использованием достоверных статистических данных и экспертных оценок, а также непосредственным вовлечением космонавтов в исследовательский процесс.

Апробация работы.

За время работы над диссертацией опубликовано 16 печатных работ, в том числе 4 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК (из них 3 работы по специальности 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов), 1 в сборниках, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus. Основные результаты работы докладывались на:

- XVIII Конференции молодых ученых, Москва, ИКИ РАН 2021 г.;
- XIII-XV Международных научно-технических конференциях «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 2021 г., 2023 г.;
- 59-х научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2024 г.;
- 72-м Международном астронавтическом конгрессе, Дубай, 2021 г.;
- XLVII Академических научных чтений по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королева, Москва, 2023 г.;
- Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ "Орбита Молодежи", Москва, 2021 г.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии. При непосредственном участии автора выполнен анализ существующего процесса выполнения космонавтами задач наблюдения и мониторинга Земли с борта ПКК и опыта формирования навыков ВИН с борта ПКК, поставлены задачи исследования, определены и рассчитаны показатели качества и эффективности имитатора универсального рабочего места ВИН (УРМ ВИН), разработаны исходные данные и разработана концептуальной модели предметной области, определены и описаны аддитивные показатели каждого элемента и факторов, влияющих на ВИН, рассчитаны ширина полосы обзора и площадь сегмента наблюдаемой поверхности, рассчитано разрешение ЗСЧ с высоты МКС, рассчитано количество пикселей по ширине экрана для устройства визуализации имитатора УРМ ВИН. Разработаны требования к цифровой визуальной модели (ЦВМ) Земли (имитируется сферичность, регулируемая высота орбиты, имитация бликов, облачности дымки, спецэффектов, плавная трансфокация с соответствующим изменением угла зрения от 90° до 2°, изменяемое разрешение от минимального 117 м/пиксел до максимального 4 м/пиксел, имитация внешних и внутренних элементов станции), разработана структуры имитатора УРМ ВИН, разработана методика оценки операторской деятельности (ООД) на УРМ ВИН, по данной методике проведены исследования на УРМ ВИН, сформулированы исходные данные на создание УРМ под станцию РОС.

Практическая значимость заключается в разработке ЦВМ Земли и уникального не имеющего аналогов в мире компьютерного имитатора УРМ ВИН с использованием современных информационных технологий. Создание имитатора ВИН позволяет определять качественные и количественные характеристики рабочего места космонавта на борту перспективных ПКК, обеспечивает необходимое качество отработки деятельности космонавта к проведению геофизических исследований с борта ПКК для решения народно-хозяйственных, оборонных, исследовательских задач и отработки технологий межпланетных полётов.

Проведенные в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» эксперименты подтвердили возможность имитации деятельности экипажей при проведении ВИН на борту орбитальных и лунных ПКК с использованием современных информационных технологий. Результаты исследований используются и будут использованы при проведении НИОКР в части разработки перспективных ПКК (включая РОС и Лунная программа), а также при подготовке экипажей МКС, РОС, ПТК «Орел», по лунной программе.

Автор исследований является ведущим инженером-электроником, специалистом по ТСПК и подготовке космонавтов к выполнению геофизических исследований методами ВИН и, непосредственно проводил подготовку 39 основных экипажей МКС.

Результаты проведенных исследований использованы при выборе структуры УРМ ПКК в рамках проведения НИР, в которых автор являлся соисполнителем, при:

- разработке эргономических требований к модулям РОС с учетом опыта эксплуатации космонавтами РС МКС;
- разработке предложений по развитию перспективных средств и технологий в части отбора, подготовки и реабилитации космонавтов для реализации российских пилотируемых программ до 2040 года.

Результаты внедрены в процесс подготовки по ВИН экипажей с экспедиции МКС-60 (16 организационно-методических документов по подготовке космонавтов).

Результаты исследований использованы при проектировании имитатора УРМ ВИН 2021-2024 годы в рамках ГОЗ.

Результаты исследований использованы при проектировании перспективного УРМ ВИН в рамках ГОЗ 2026-2028 годов (написано ТЗ). Дальнейшее развитие УРМ ВИН предусматривает использование перспективных компьютерных технологий на основании разработанной ЦВМ.

Создаваемые на основе исследований технические средства подготовки космонавтов с использованием современных информационных технологий относится к перечню критических технологий (Раздел 3. Науки о жизни, пункт 3.1.2. дефис 4 «Технологии разработки систем информационного обеспечения, методов и средств повышения эффективности процессов отбора и подготовки космонавтов, их деятельности на борту пилотируемых космических средств»), разрабатываемых в целях выполнения плана мероприятий по научно-технологическому развитию и технологической модернизации экономики РФ (утверждены Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. №899).

Проведенные исследования соответствуют приоритетному направлению научно-технологического развития РФ: «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов» и важнейшей наукоемкой технологии: «Технологии космического приборостроения для развития современных систем связи, навигации и дистанционного зондирования» (Указ Президента РФ от 18.06.2024 № 529 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий").

Структура и объем работы. В соответствии с решением поставленных задач работа структурно состоит из 4-х глав и 2-х приложений. Работа содержит 167 страницы, 40 рисунков, 14 таблиц и 111 источников использованной литературы. По итогам исследований создан и используется имитатор УРМ для формирования устойчивой деятельности оператора для проведения ВИН с борта ПКК на основе современных информационных технологий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, приведен перечень частных задач исследования и краткая аннотация содержания работы по главам, дана оценка новизны и практической значимости работы, реализация и апробация полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен системный анализ процесса выполнения космонавтами программ ВИН на борту существовавших и современных ПКК, разработаны предложения по разработке имитатора УРМ ВИН, выполнена математическая формализация решаемой в работе научной задачи.

Отличительная особенность профессии космонавта состоит в том, что возможность приобретения опыта реальной деятельности до осуществления полета практически исключена. Поэтому для успешного решения задач обучения и подготовки необходимо формирование и рассмотрение концептуальной модели деятельности космонавта адекватной и максимально приближенной к его работе в космическом полете.

На выполнение научных экспериментов, космонавт тратит около 40% всего рабочего времени на борту РС МКС. Общий объем экспериментов по направлению «Исследования Земли и космоса», связанных с геофизическими экспериментами и мониторингом Земли с борта РС МКС, осуществляемых методом ВИН, составляет порядка 60% от всего объема времени, затраченного на выполнение программы научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС, рисунок 1. В рамках указанной программы в настоящее время на борту РС МКС проводятся научные эксперименты «Ураган», «Дубрава», «Сценарий», «Экон». На рисунке 2 показано количество часов, которое тратит каждая экспедиция на выполнение экспериментов связанных с наблюдением Земли.



Рисунок 1 – Процентное отношение времени, затраченного на выполнение КЭ по направлению «Исследование Земли из космоса»

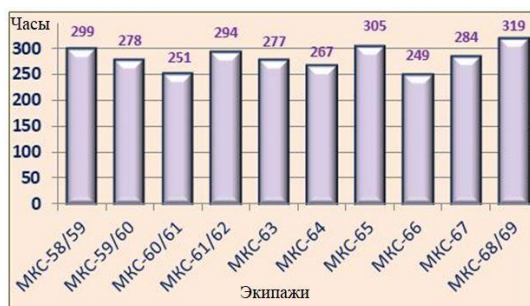


Рисунок 2 – Количество часов, затраченных на КЭ, по направлению «Исследование Земли из космоса» по экспедициям МКС

Определены проблемные вопросы выполнения ВИН космонавтами на борту ПКК:

- создается перспективная РОС, одной из основных целей которой будет исследование поверхности Земли;
- при выполнении мониторинга Земли с борта РС МКС космонавты испытывают трудности с поиском и обнаружением ориентиров и объектов наблюдения, особенно в первом

космическом полете (это связано с тем, что на Земле трудно симитировать реальную визуальную полетную обстановку, кроме того время, отведенное на поиск и определение объекта, составляет несколько секунд);

– на выработку навыков ориентирования для выполнения качественной работы уходит 2-3 месяца, что очень много, учитывая длительность экспедиции около полугода.

Целесообразно разработать имитатор УРМ для моделирования деятельности выполнения ВИН оператором, позволяющий отработать действия на Земле, связанные с ВИН, и рассмотреть подходы для проектирования УРМ для перспективных ПКК с учётом наблюдения приполярных областей.

Схема организации и проведения исследования представлена на рисунке 3. В работе для проектирования имитатора УРМ используется наиболее распространенный метод трёхуровневого моделирования. То есть, разрабатывается концептуальная модель предметной области, логическая модель предметной области и физическая модель разрабатываемой системы. Для оценки деятельности космонавтов разрабатывается методика ООД для имитатора УРМ ВИН.

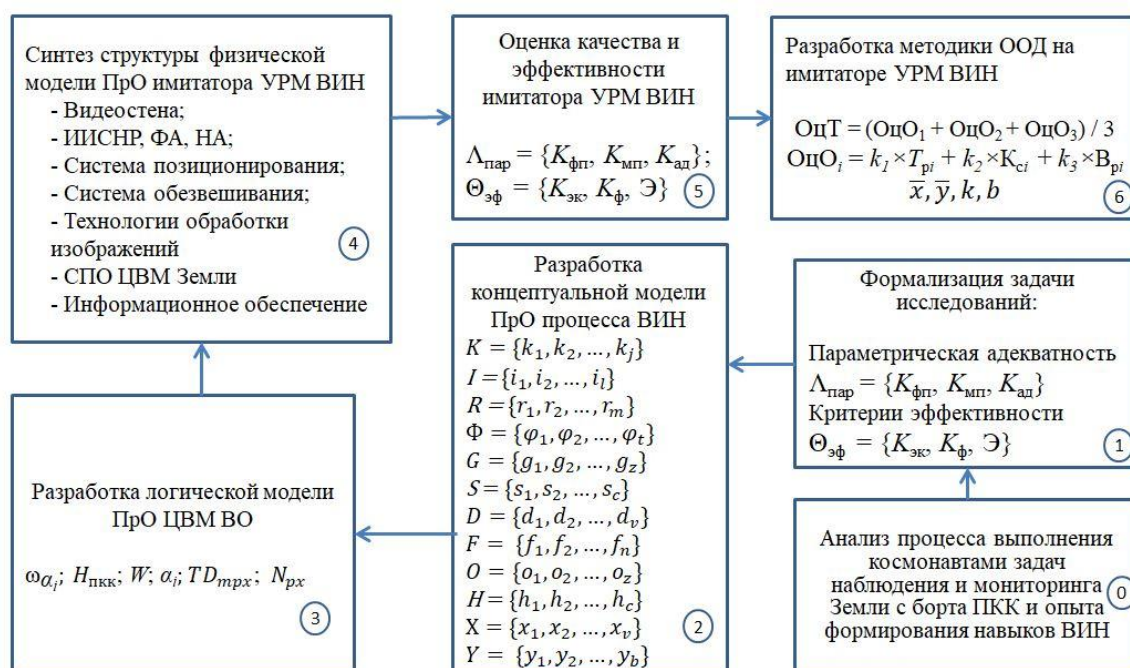


Рисунок 3 – Методическая схема решения научной задачи

Задача исследования состоит в проектировании имитатора УРМ ВИН с максимальными показателями качества и эффективности при существующих ограничениях, таких как разрешающая способность наблюдаемой поверхности (адекватной зрительной системе человека), ограничение полосы обзора наблюдаемой поверхности, динамичность наблюдаемой поверхности, использование средства регистрации, наличие факторов ухудшающих выполнение ВИН.

Для получения количественных оценок проектируемого УРМ в системе формирования деятельности ВИН введены показатели параметрической адекватности, составляющие показателей параметрической адекватности и критерии эффективности проектируемого имитатора УРМ ВИН.

Показатели параметрической адекватности представлены множеством

$$\Lambda_{\text{пар}} = \{K_{\text{фп}}, K_{\text{мп}}, K_{\text{ад}}\},$$

где $K_{\text{фп}}$ – коэффициент функциональной полноты, $K_{\text{мп}}$ – коэффициент методической полноты, $K_{\text{ад}}$ – коэффициент параметрической адекватности.

Коэффициент функциональной полноты $K_{ФП}$ определяется как отношение количества отрабатываемых на данном тренажере навыков $N_{Нj}$ к общему числу навыков $N_{Н}$, необходимых для выполнения операции ВИН

$$K_{ФП} = \frac{N_{Нj}}{N_{Н}}. \quad (1)$$

Коэффициент методической полноты $K_{МП}$ определяется как отношение количества реализуемых на данном тренажере методических принципов $N_{Мj}$ к их общему количеству $N_{М}$

$$K_{МП} = \frac{N_{Мj}}{N_{М}}. \quad (2)$$

Коэффициент параметрической адекватности имитируемых средств и условий операции ВИН $K_{АД}$ определяется как отношение меньшего из значений Ω_{\min} соответствующих параметров к большему Ω_{\max}

$$K_{АД} = \frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}}. \quad (3)$$

Идеальное УРМ количественно характеризуется следующими значениями коэффициентов

$$K_{ФП} = 1, K_{МП} = 1, K_{АД} i = k_i, i = 1, 2, \dots, N_{ад}$$

где $N_{ад}$ – общее число имитируемых параметров системы и условий ее применения. Таким образом, степень совершенства УРМ оценивается мерой приближения его параметров к этим значениям.

Введен интегральный коэффициент $K_{ИН}$ качества имитатора УРМ

$$K_{ИН} = \sigma_1 K_{МП} + \sigma_2 K_{ФП} + \sigma_3 K_{АД} \quad (4)$$

Эксперты (космонавты и специалисты) предложили использовать для имитатора УРМ ВИН одинаковые значения весовых коэффициентов σ равные 0,33.

Эффективность разрабатываемого имитатора УРМ ВИН оценивается на основании множества специальных критериев $\Theta_{эф} = \{K_{эк}, K_{ф}, \mathcal{E}\}$, где $K_{эк}$ – критерий экономической эффективности, $K_{ф}$ – критерий эффективности формирования деятельности ВИН на УРМ, \mathcal{E} – составной критерий эффективности.

Критерий экономической эффективности $K_{эк}$ рассчитывается по формуле

$$K_{эк} = \frac{F(P)}{Z}, \quad (5)$$

где $F(P)$ – целевая отдача (целевая функция), т.е. прибыль, полученная в результате проведения исследований и экспериментов, выполненных на борту ПКК, Z – затраты на производство и эксплуатацию УРМ.

Критерий эффективности $K_{ф}$ формирования деятельности ВИН на универсальном рабочем месте рассчитывается по формуле

$$K_{ф} = P_{ф}(t)P_{оп}(t), \quad (6)$$

где $P_{ф}(t)$ – вероятность безотказного функционирования рабочего места; $P_{оп}(t)$ – вероятность нахождения объекта наблюдения

$$P_{оп}(t) = P_{обн}(t)P_{уд}(t)P_c(t)P_{кc}(t), \quad (7)$$

где $P_{обн}(t)$ – вероятность обнаружения объекта наблюдения; $P_{уд}(t)$ – вероятность удержания объекта в объективе средства регистрации; $P_c(t)$ – вероятность получения снимка; $P_{кc}(t)$ – вероятность получения качественного снимка (объект в центре кадра, нет смаза).

Составной критерий эффективности \mathcal{E} рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = k_1 \mathcal{E}_1 + k_2 \mathcal{E}_2 + \dots + k_n \mathcal{E}_n \quad (8)$$

где $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_n$ – частные показатели эффективности, входящие в систему частных показателей; k_1, k_2, \dots, k_n – весовые коэффициенты, определяющие относительную зависимость частных показателей от различных проектных решений.

На основании опыта подготовки космонавтов определены следующие частные показатели эффективности УРМ ВИН: \mathcal{E}_1 – наличие подложки зима/лето; \mathcal{E}_2 – информационное обеспечение; \mathcal{E}_3 – наличие факторов ухудшающих выполнение ВИН за счет ограничения поля зрения; \mathcal{E}_4 – адекватность имитируемого изображения; \mathcal{E}_5 – возможность использования

средства регистрации (штатного ФА, имитатора ФА, НА); Ξ_6 – количество объектов детального наблюдения. Весовые коэффициенты k_1, k_2, \dots, k_n введены экспертным (космонавты и специалисты) методом последовательных сравнений.

Во второй главе разработана концептуальная модель предметной области процесса выполнения космонавтами мониторинга наблюдаемой поверхности с борта перспективных ПКК методами ВИН. Определены и описаны аддитивные показатели каждого элемента и факторов, влияющих на выполнение ВИН с борта ПКК. Концептуальная модель предметной области процесса операторской деятельности при выполнении ВИН Земли с борта ПКК представлена на рисунке 4 и представляет собой сложную структуру взаимодействия следующих элементов системы: экипажа ПКК, бортовых систем ПКК, Центра управления полетом (ЦУП), объектов наблюдения и направлена на эффективное выполнение задач наблюдения.



Рисунок 4 – Концептуальная модель предметной области процесса выполнения ВИН

Процесс операторской деятельности при выполнении ВИН включает несколько ключевых этапов, рисунок 5:

- планирования сеансов ВИН (изучение множества исходных данных $I = \{i_1, i_2, \dots, i_l\}$);
- подготовка к выполнению сеансов ВИН (подготовка набора используемой аппаратуры $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ и изучение множества объектов исследований с характеристиками $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_t\}$);
- выполнение сеанса ВИН (поиск, обнаружение, распознавание и регистрация объекта + ведение репортажа);
- заключительный этап (обработка полученных изображений и сброс множества полученных данных $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на Землю).



Рисунок 5 – Основные этапы ВИН

На качество и эффективность выполнения экспериментов, связанных с ВИН, влияют личные качества и психофизиологические особенности оператора $K = \{k_1, k_2, \dots, k_j\}$, такие как способность быстро оценить ситуацию, спрогнозировать развитие событий, принимать решения в условиях дефицита времени, оценивать расстояние, размер, форму, положение объектов в пространстве, прогнозировать их движение, пороги световой, контрастной и спектральной чувствительности.

Задание на выполнение наблюдения оператор получает из ЦУПа в виде радиограммы, в которой прописаны множество исходных данных для выполнения ВИН $I = \{i_1, i_2, \dots, i_l\}$, такие как наименование КЭ, время и дата, цели и задачи съемки, какое средство регистрации и наблюдения использовать $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ и с какими характеристиками $H = \{h_1, \dots, h_a\}$, используемый иллюминатор для съемки, перечень объектов наблюдения с характеристиками $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_t\}$, снимки для ориентира, указания по сбросу данных.

Для изучения объектов наблюдения оператор использует набор средств информационного обеспечения $D = \{d_1, d_2, \dots, d_v\}$, в который входят радиограмма, БД, навигационная система, полетное задание, атлас. Выполнение ВИН из космоса зависит от конструктивных особенностей ПКК $O = \{o_1, \dots, o_y\}$ и множества внешних факторов $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, которые могут влиять как на качество получаемых данных, так и на саму возможность проведения наблюдений, к таким факторам относятся: высота орбиты, наклонение орбиты, тип орбиты, облачность, дымка, пыль, освещенность, время суток, сезон года, состояние иллюминаторов, конструктивные особенности ПКК, тип объекта наблюдения, дефицит времени.

В заданное в радиограмме время, оператор ориентируется на наблюдаемой поверхности Земли, находит географические ориентиры $G = \{g_1, g_2, \dots, g_z\}$, по ним находит район, где находится объект наблюдения, затем наводит средство регистрации в данный район и через окно видоискателя, по объектам реперам находит искомый объект и выполняет съемку.

После завершения наблюдений проводится анализ полученных данных, обработка изображений с использованием специализированного программного обеспечения и передача информации $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на Землю в ЦУП для дальнейшего использования и анализа. На связь с ЦУП влияет ряд технических процессов $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_b\}$, таких как скорость обмена информацией, качество и надежность канала связи, передаваемых команд и рекомендаций экипажу.

Разработанная концептуальная модель относится к классу интеллектуальных систем, учитывает возможности автоматизации многих этапов работы, обработку больших объемов данных, формирование решений. Формальное представление этой математической модели представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Концептуальная модель, как математическая модель системы класса интеллектуальные системы *IS*

№	Наименование объекта	Обозначение	Примечание
1	Набор параметров системы	$C = \{K, D, S, H\}$	Набор множеств с определенными на них отношениями
1.1	Фазовое пространство системы	$C = K \times D \times S \times H$	$K = \{k_1, \dots, k_j\}, j = 18$ $D = \{d_1, \dots, d_v\}, v = 5$ $S = \{s_1, \dots, s_\mu\}, \mu = 4$ $H = \{h_1, \dots, h_a\}, a = 5$
1.2	Фазовые состояния данной системы	$c = \{k, d, s, h\}$	$c \in C$
1.3	Фазовые координаты (переменные) данной системы	k, d, s, h	$k \in K, d \in D, s \in S, h \in H$
1.4	Область допустимых значений фазовых состояний системы	$C \subseteq C'$	C' – множество допустимых состояний системы
1.5	Неконтролируемые возмущения	$u \in U$	$U = \{F, O, Y\}$ – множество допустимых состояний системы $F = \{f_1, \dots, f_n\}, n = 11$ $O = \{o_1, \dots, o_\gamma\}, \gamma = 10$ $Y = \{y_1, \dots, y_b\}, b = 10$
1.6	Управляющее воздействие	$i \in I$	$I = \{i_1, \dots, i_l\}, l = 9$ I – область управляющих воздействий
1.7	Цель управления системы	$\varphi \in \Phi$	$\Phi = \{\varphi_1, \dots, \varphi_\beta\}$ Φ – множество целей управления данной системы
1.8	Руководство для целеполагания	$r \in R, g \in G$	$R = \{r_1, \dots, r_m\}$ $G = \{g_1, \dots, g_z\}$ $\{R, G\}$ – множество для целеполаганий
1.9	Конечные данные	$x \in X$	$X = \{x_1, \dots, x_q\}$ X – множество конечных данных
2	Набор рескриптов системы	$P = P_\gamma,$ $\gamma = 1, 2, \dots, w$	Набор преобразований всех видов
2.1	Правило определения текущего состояния системы по состояниям во все предыдущие моменты	$P = P(c, u, i, t)$	$c \in C, u \in U, i \in I, t \in T$ $c(t)$ – текущее состояние системы в момент времени t $u(t)$ – внешнее возмущение в момент времени t $i(t)$ – управляющие воздействия в момент времени t
2.2	Механизм модификации правила определения состояния системы	$\Psi = \Psi(z, t)$ $z(t) = P'(c, u, i, t)$	$z \in Z, t \in T$ Механизм Ψ описывает способы модификации правила P , ($\Psi = P'$) $z(t)$ – текущая цель системы в момент времени t P' – модифицированное правило определения состояния системы
2.3	Правило порождения целей	$\Omega = \Omega(c, u, i, z, t)$	$\Omega = z'(t)$ $z'(t)$ – новая цель, которую система должна достичь

3	Часы системы	$\Lambda = \{T_s, E_c\}$	Состоит из множеств: T_s – системное время, E_c – механизм активности
4	Системное время	$T_s \in T$	Множество моментов времени функционирования системы
5	Мировое время	$T, t_\alpha \leq t_{\alpha+1}$	Множество всех моментов времени, наделенных структурой линейного порядка $t_\alpha \leq t_{\alpha+1}$
6	Механизм активности системы часов	E_c	Тактовый генератор системы, запускающий часы системы

Общая концепция модели интеллектуальной системы может быть представлена в виде:

$$IS = \{\mathcal{E}, B, Q, A\},$$

где \mathcal{E} – экипаж ПКК (операторы на борту станции); B – бортовые системы (оборудование и программы на борту МКС); Q – Центр управления полетом (ЦУП); A – объекты наблюдения (наземные цели). \mathcal{E}, B, Q, A – отдельные множества, каждое из которых включает набор переменных, характеризующих состояние соответствующих компонент системы.

Экипаж $\mathcal{E}(t) = \{K(t), N_E(t)\}$, где $K(t)$ – личных качеств и психофизиологическое состояние членов экипажа в момент времени t , $N_E(t)$ – численность экипажа в момент времени t .

Бортовые системы $B(t) = \{D(t), S(t), H(t), O(t)\}$, где $D(t)$ – состояние средств информационного обеспечения, $S(t)$ – используемое средство наблюдения и регистрации (ФА, НА), $H(t)$ – технические характеристики используемого средства наблюдения и регистрации (чувствительность, уровень заряда батареи, исправность), $O(t)$ – конструктивные особенности станции.

Центр управления полетом $Q(t) = \{I(t), X(t), Y(t)\}$, где $I(t)$ – исходные данные (могут меняться в зависимости от конкретных задач, стоящих перед экспедицией), $X(t)$ – получаемые фото изображения с борта, $Y(t)$ – состояние технических систем (состояние серверов и рабочих станций ЦУПа, степени перегруженности системы, технического обслуживания).

Объекты наблюдения $A(t) = \{\Phi(t), G(t), R(t), F(t)\}$, где $\Phi(t)$ – параметры объекта наблюдения (расположение относительно трассы полета, размер, форма, контрастность), $G(t)$ – географические ориентиры, $R(t)$ – реперные точки, $F(t)$ – внешние факторы, влияющие на выполнение ВИН.

Все данные процессы формируют сеть зависимостей, выражаемых формулой:

$$\Sigma(IS) = \{\Sigma_{\mathcal{E}B}, \Sigma_{BQ}, \Sigma_{QE}, \Sigma_{IS \rightarrow A}\}$$

где $\Sigma_{\mathcal{E}B}(\mathcal{E}, B)$ – функция описывающая поток данных от экипажа к бортовым системам и показывает влияние человеческого фактора на работу технических средств; $\Sigma_{BQ}(B, Q)$ – функция описывающая поток данных от бортовых систем к ЦУП и описывает передача результатов наблюдений; $\Sigma_{QE}(Q, \mathcal{E})$ – функция, описывающая обратную связь и рекомендации экипажу; $\Sigma_{IS \rightarrow A}$ – воздействие всей системы на объект наблюдения

Задача системы состоит в максимизации показателя эффективности наблюдений: количества качественных снимков за единицу времени, при ограничениях типа работоспособность оборудования, достаточность объема оперативной памяти, дефицит времени:

$$\max_{\mathcal{E}, B, Q} \tau(K, N_E, D, S, H, O, I, X, Y, \Phi, G, R, F).$$

Разработанная концептуальная модель предметной области процесса операторской деятельности при выполнении ВИН Земли учитывает все составляющие данного процесса и их взаимодействие, позволяет создать логическую и физическую модели наземного компьютерного имитатора рабочего места космонавта на борту ПКК для выполнения ВИН.

В работе представлены математические зависимости для определения требований к созданию цифровой визуальной модели имитатора рабочего места космонавта ВИН.

Рассчитаны рабочие зоны для выполнения ВИН, которые определяются высотой орбиты ПКК – $H_{\text{ПКК}}$ и углом обзора от направления в надир α_i (рисунки 6,7), в том числе применительно для РОС и лунных станций.

По результатам проведенных исследований выявлено, что для получения качественных фотоснимков съемка должна выполняться в зоне ограниченной углом обзора $\pm 30^\circ$ (от направления в надир), зона обнаружения объекта ограничена углом $\pm 45-60^\circ$.



Рисунок 6 – Полоса обзора поверхности Земли с борта ПКК

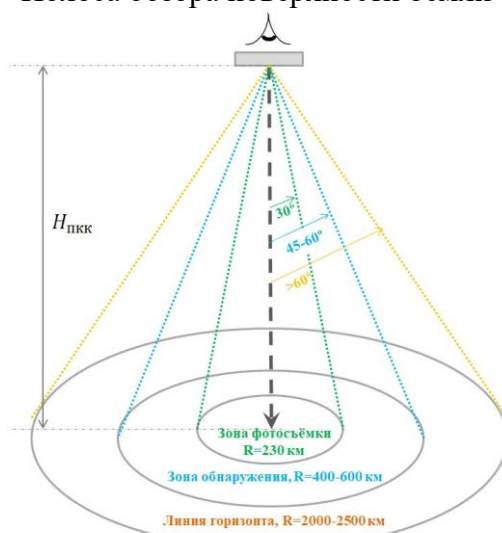
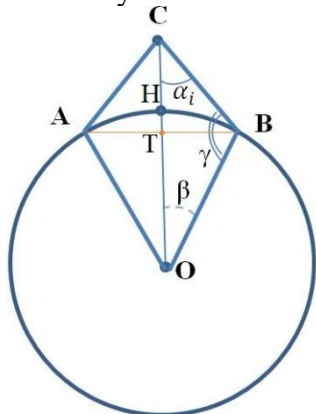


Рисунок 7 – Рабочие зоны при выполнении ВИН

Вычисление ширины полосы обзора W (рисунок 8) наблюдаемой поверхности определено по выражениям 9–11. Для расчёта ширины полосы наблюдаемой поверхности учтены кривизна Земли и Луны.



$$W = |\widehat{AB}| = \frac{\pi \cdot R \cdot 2\beta}{180^\circ}, \quad (9)$$

где R – радиус наблюдаемой поверхности (Земли/Луны);
 $R = OA = OB = OH$, $CH = H_{\text{ПКК}}$;

$$\sin \gamma = \frac{CO \cdot \sin \alpha_i}{OB} = \frac{(H_{\text{ПКК}} + R) \cdot \sin \alpha_i}{R}; \quad (10)$$

$$\beta = 180^\circ - (\alpha_i + \gamma) \quad (11)$$

Рисунок 8 – Опорный рисунок для вычисления ширины полосы обзора

Вычисление площади сегмента S наблюдаемой поверхности вычисляется по формуле

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot HT, \quad (12)$$

где

$$HT = \sqrt{R^2 - TB^2}. \quad (13)$$

Проведено вычисление ширины полосы наблюдаемой поверхности и площади сегмента наблюдаемой поверхности для углов обзора $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ и $\pm 60^\circ$ современных и перспективных ПКК, результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчеты для рабочих зон имеющихся и перспективных ПКК

	α_i	30°		45°		60°	
ПКК:	$H_{ПКК}$, км	W , км	S , км ²	W , км	S , км ²	W , км	S , км ²
МКС	400	467	171 271	827	537 346	1 552	1 890 348
ОС РОС	332-410	387-478	117 905-179 988	682-849	364 744-565 583	1 258-1 597	1 242 395-2 000 082
ОС Луны	100	117	10 681	206	33 384	384	115 489

В третьей главе разработана структура и требуемые характеристики для цифровой модели визуальной обстановки (ЦВМ) наблюдаемой поверхности с борта ПКК (логическая модель предметной области) и разработана структура имитатора УРМ проведения ВИН космонавтами с борта имеющихся и перспективных ПКК (физическая модель), которая отличается использованием современных компьютерных технологий. Выполнена оценка качества и эффективности существующих и перспективных имитаторов УРМ ВИН. Базовым элементом создания компьютерного имитатора УРМ космонавта для решения задач ВИН является создание ЦВМ наблюдаемой поверхности.

В работе рассчитано линейное разрешение зрительной системы человека ω_{α_i} на местности при наблюдении подстилающей поверхности с высоты полета ПКК в надир по формуле 14 и на границах рабочих зон ВИН (рисунок 7) по формуле 15, с учетом того, что разрешающая способность зрительной системы человека при нормальном зрении и оптимальных условиях освещенности в среднем равна $1'$, то есть

$$\omega_{1^\circ} = \frac{\operatorname{tg} 1^\circ \cdot H_{ПКК}}{60} \quad (14)$$

$$\omega_{\alpha_i} = \frac{\sin 1^\circ \cdot \sqrt{H_{ПКК}^2 + (0,5 \cdot W(\alpha_i))^2}}{\cos(\alpha_i - 1^\circ) \cdot 60} \quad (15)$$

В результате вычислений получено, что линейное разрешение глаза на местности при наблюдении подстилающей поверхности с высоты 400 км через иллюминатор в надир составляет 117 м (при абсолютном контрасте). При отклонении линии визирования от надира на углы $\alpha_i = 30^\circ, 45^\circ-60^\circ$ (в соответствии с рабочими зонами на рисунке 7) ухудшает линейное разрешение глаза на местности, которое (по законам геометрической оптики) будет равно соответственно 154 и 233-494 м. С учетом реальных контрастов подстилающей поверхности, перспективных искажений и кривизны Земли линейное разрешение будет существенно хуже указанных значений. Таким образом, при имитации изображения поверхности Земли средство визуализации должно иметь плотность текстуры 117 м/пиксел, при отклонении линии визирования от надира линейное разрешение должно ухудшаться пропорционально увеличению дальности наблюдения. При имитации наблюдения с помощью оптических и оптико-электронных средств линейное разрешение должно возрастать пропорционально кратности увеличения прибора.

Сформулированы требования к ЦВМ Земли: должна быть основана на базе космофотоснимков, разрешение от 117 м/пиксел (для адекватного наблюдения с высоты $H_{ПКК}$) до 15 м/пиксел (для возможности детального наблюдения), имитация положения Солнца, Луны, навигационных звезд, моделирование слоя облачности, дымки, имитация внешних и

внутренних элементов станции, сферичность, динамичность, высота орбиты МКС, блики на водной поверхности, ширина полосы наблюдаемой поверхности 827 км, обеспечена возможность имитации плавного изменения положения камеры и ориентации инструментальных средств наблюдения относительно иллюминатора, возможность имитации плавной трансфокации с соответствующим изменением угла зрения от 90° до 2° , ширина полосы наблюдаемой поверхности 827 км, возможность регистрации деятельности оператора. Для создания ЦВМ Земли впервые определены и использованы современные компьютерные технологии: бесшовные карты, метод тайлов, метод Гильберта, внедрение трекеров, использование 4х-слойной визуализации, подкачка изображений (рисунок 9). На базе ЦВМ – создано специальное программное обеспечение СПО ЦВМ Земли, описание которого приложено к работе.



Рисунок 9 – Структура цифровой модели визуальной обстановки «СПО ЦВМ Земли»

В работе рассчитано, каким минимальным количеством пикселей по ширине экрана N_{px} должно обладать средство визуализации для адекватного отображения подстилающей поверхности. На рисунке 10 показан наблюдатель, смотрящий на экран, на котором симметрировано изображение подстилающей поверхности Земли с высоты $H_{ПКК}$.

Формула для вычисления количества пикселей по ширине экрана для устройства визуализации имитатора УРМ ВИН

$$N_{px} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \cdot H_{ПКК}}{TD_{mrx}} \quad (16)$$

где TD_{mrx} – плотность (разрешающая способность) текстуры в м/пиксел, которая должна соответствовать ЗСЧ.

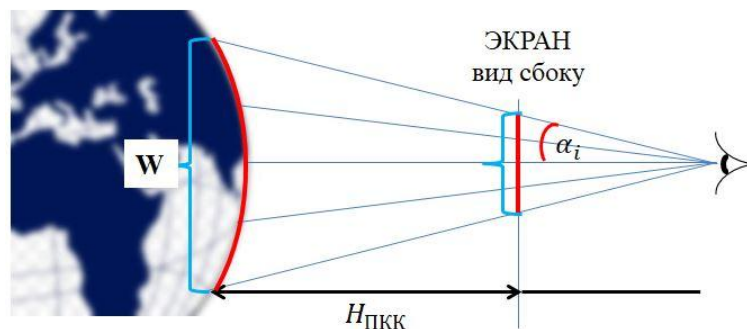


Рисунок 10 – Схема для расчета количества пикселей по ширине экрана для устройства визуализации имитатора УРМ ВИН

В результате вычислений получено, что минимальное количество пикселей по ширине экрана, которым должно обладать средство визуализации для адекватного отображения подстилающей поверхности Земли для МКС, при $H_{\text{пкк}} = 400$ км, полосы обзора 827 км при угле обзора 90° с $TD_{\text{мрх}} = 117$ м/пиксел разрешение экрана должно составлять **6837 пиксел**.

Проведено экспериментальное исследование, в результате которого получено, что штатный ФА Nikon D850 с объективом 400-800 мм фокусируется на экране средства визуализации на расстоянии 1,7 м. Для устойчивой настройки ФА рекомендовано располагать устройство визуализации на расстоянии 2 м. Кроме того расстояние 2 м обеспечивает угол обзора оператору 90° .

На основании концептуальной и логической модели в 2022 году в ЦПК был создан имитатор УРМ ВИН («Тренажер ВИН»). УРМ позволяет: имитировать поверхность Земли с адекватным разрешением, задавать любое наклонение орбиты от 0° до 100° , отображать подстилающую поверхность до 85° по широте, использовать при подготовке средство регистрации изображения (штатный ФА, ИИСНР, НА), отображать факторы, ухудшающие условия наблюдения и спецэффекты (пожары, пылевые бури, извержение вулканов). Средством визуализации имитатора УРМ ВИН является видеостена (рисунок 11), состоящая из девяти ТВ-панелей с разрешением 4К и диагональю 75 дюймов каждая, с суммарным разрешением 11520 на 6480 пикселей и плотностью текстуры $TD_{\text{мрх}} = 72$ м/пиксел, что существенно лучше заявленных 117 м/пиксел. Видеостена расположена на расстоянии 2 метра от макета иллюминатора, что позволяет использовать штатный ФА с объективом 400-800 мм и обеспечивает угол обзора 90° .

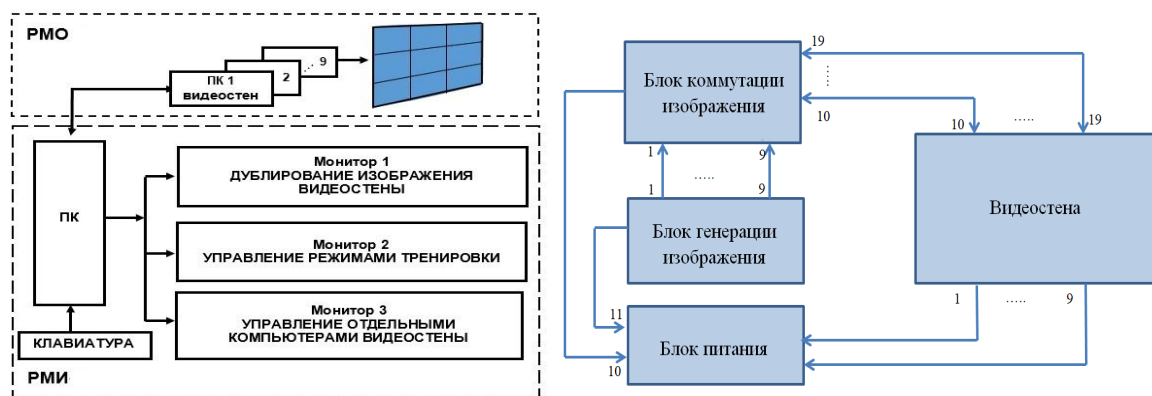


Рисунок 11 – Схема имитатора УРМ ВИН («Тренажер ВИН»)

Данные подходы, использованные при создании имитатора УРМ ВИН, применимы при разработке и создании тренажеров для подготовки космонавтов по перспективным космическим программам: для РОС и полетах к Луне. Дальнейшее развитие имитатора УРМ ВИН предусматривает использование перспективных компьютерных технологий на основании разработанной ЦВМ.

Положительный эффект от использования данного имитатора УРМ ВИН:

- сократились сроки выработки навыков ориентирования и выполнения в полёте задач ВИН со среднестатистических 2-х месяцев до 3-х недель;
- проведение тренировок с использованием данного УРМ позволило повысить вероятность обнаружения объектов наблюдения с борта МКС с 0,75 до 0,89 (повышение вероятности получения качественного снимка на 14%).

Расчеты значений коэффициентов функционально-методической полноты $K_{\text{ФП}}$, $K_{\text{МП}}$, параметрической адекватности $K_{\text{АД}}$ и интегральный коэффициент $K_{\text{ИН}}$ для имитаторов УРМ разных поколений (формулы 1–4) были получены на основе оценки группы экспертов, составленной из космонавтов, имеющих опыт выполнения операций ВИН в космическом полете, и специалистов по данному виду подготовки и приведены в таблице 3. Данные по проведенной экспертной оценке приведены в приложении Б к работе. При этом под

имитаторами УРМ ВИН первого поколения подразумеваются средства подготовки космонавтов на основе бумажных географических карт.

Критерии эффективности $K_{эк}$, $K_{ф}$, \mathcal{E} созданного имитатора УРМ ВИН и прогнозы по перспективному имитатору УРМ ВИН рассчитаны по формулам 5–8 и представлены в таблице 3.

Впервые по формулам 17–19 рассчитан годовой экономический эффект $K_{эк}$ от использования имитатора УРМ ВИН, который получен за счет сокращения затрат времени космонавтов на выполнение работ по ВИН в полете и повышения количества качественных снимков в полете.

Значение функции $F(P)$ (формула 17) определяется как годовой полезный эффект от использования данного имитатора УРМ при подготовке космонавтов и включает в себя эффект от снижения времени на выполнение операций ВИН в полете за счет повышения качества подготовки космонавтов – F_1 и эффект от повышения вероятности выполнения качественного сеанса ВИН в полете – F_2 :

$$F(P) = F_1 + F_2 \quad (17)$$

$$F_1 = \Delta K_{\text{подг}} \cdot N_{\text{эк}} \cdot T \cdot M \quad (18)$$

$$F_2 = \Delta P_{\text{вин}} \cdot N_{\text{эк}} \cdot K_{\text{уст.нав.}} \cdot T \cdot M \quad (19)$$

где $\Delta K_{\text{подг}}$ – повышение качества подготовленности члена экипажа за счет использования УРМ; $N_{\text{эк}}$ – число российских членов экипажа, выполняющих ВИН на борту ПКК; T – время, затрачиваемое на выполнение ВИН одним членом экипажа в полете; M – стоимость 1 часа работы космонавта на борту ПКК; $\Delta P_{\text{вин}}$ – повышение вероятности выполнения качественного сеанса ВИН в первые 2 месяца полета; $K_{\text{уст.нав.}}$ – коэффициент учитывающий формирование устойчивого навыка ВИН через 2 месяца.

Предполагаемый годовой полезный эффект от использования созданного имитатора УРМ ВИН составил 450 585 528 рублей при повышении качества подготовки на 27%, повышении вероятности получения качественных снимков на 14% за первые 2 месяца полета космонавта, при этом затраты на создание имитатора УРМ ВИН в целом составили 56 200 000 рублей.

В работе показано, что в ближайшие годы для формирования устойчивой деятельности выполнения ВИН с борта перспективных ПКК будет возможна разработка имитатора УРМ ВИН 3 поколения на основе созданной ЦВМ, но с применением перспективных цифровых проекторов, которое будет удовлетворять значениям критериев не хуже значений приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочные параметры имитаторов УРМ ВИН разных поколений

Поколение ТСПК	$K_{фп}$	$K_{мп}$	$K_{ад}$	$K_{ин}$	$K_{эк}$	$P_{ф}$	$P_{оп}$	$K_{ф}$	\mathcal{E}
УРМ ВИН 1 поколения (на основе географических карт)	0,2	0,45	0,18	0,27	–	–	–	–	1,28
УРМ ВИН 2 поколения (на основе ЦВМ Земли)	0,85	0,73	0,71	0,76	450 585 528/ 56 200 000	0,95	0,96	0,912	4,72
УРМ ВИН 3 поколения (на основе виртуальной реальности)	0,9	0,91	0,88	0,89	–	>0,95	>0,95	>0,9	4,86

В четвертой главе впервые разработана методика ООД космонавта на имитаторе УРМ при формировании навыков проведения ВИН с борта перспективных ПКК.

Методика позволяет рассчитать количественный показатель по оценке работы оператора на имитаторе УРМ по 5-ти бальной системе с точностью до десятых.

Общая оценка работы оператора должна включать в себя следующие параметры:

- полнота репортажа об объектах и выполняемых операциях;
- количество найденных объектов;
- качество фото регистрации объекта.

С целью учета значимости параметров работы оператора каждому из рассматриваемых параметров присвоить свои весовые коэффициенты, представленные в таблице 4.

Критерии оценки параметров работы оператора приведены в таблице 5.

Оценка за тест вычисляется как средняя, из всех полученных оценок за работу по каждому из трех объектов задания с учетом весовых коэффициентов его параметров:

$$\text{ОцТ} = (\text{ОцО}_1 + \text{ОцО}_2 + \text{ОцО}_3) / 3 \quad (19)$$

В случае, когда объект не опознан, работа с объектом считается невыполненной и суммарная оценка за работу с данным объектом не вычисляется и считается равной «1» баллу.

$$\text{ОцО}_i = k_1 \times T_{pi} + k_2 \times K_{ci} + k_3 \times B_{pi} \quad (20)$$

где ОцО_i – оценка за каждый из трех объектов задания; k_i – весовые коэффициенты параметров работы оператора (см. таблицу 4); T_{pi} – время опознания и начала регистрации заданного объекта; K_{ci} – оценка качества сопровождения; B_{pi} – оценка ведения репортажа об объектах и выполняемых операциях.

Таблица 4 – Весовые коэффициенты параметров работы оператора

№	Параметры	Обозначение	Весовой коэффициент	
1	Время до обнаружения и начала регистрации заданного объекта	T_p	k_1	0,4
2	Оценка качества сопровождения	K_c	k_2	0,4
3	Полнота ведения репортажа об объектах и выполняемых операциях	B_p	k_3	0,2

Таблица 5 – Критерии оценки параметров работы оператора

№	Параметры	Обозначение	Оценка значений параметров				
			5	4	3	2	1
1	Время до обнаружения и начала регистрации заданного объекта, сек	T_p	До 10	10-15	15-20	20-25	Хуже 25
2	Оценка качества сопровождения	K_c	До 5	5-10	10-15	15-20	Хуже 20
3	Полнота ведения репортажа об объектах и выполняемых операциях	B_p	- оператор опознал и назвал объект; - смог охарактеризовать объект; - оператор смог опознать до 80% ГО; - уверенно комментировать выполняемые им операции	- оператор опознал и назвал объект; - не смог уверенно охарактеризовать (описать) объект; - оператор смог опознать до 60% ГО; - в основном репортаж излагал связно	- оператор опознал и назвал объект; - не смог уверенно охарактеризовать (описать) объект; - оператор смог опознать до 40% ГО; - в основном репортаж излагал связно	- оператор не опознал или неправильно о назвал объект; - не смог охарактеризовать объект; - оператор смог опознать до 20% ГО; - репортаж излагался несвязно и без должной последовательности	- оператор не вел репортаж

На основании разработанной методики были проведены экспериментальные исследования с кандидатами в космонавты и космонавтами на всех трех этапах подготовки по оценке качества отработки навыков деятельности ВИН на УРМ ВИН. Был посчитан средний балл за каждую тренировку и путем аппроксимации графика функции была проведена линейная регрессия методом наименьших квадратов.

В работе введены обозначения: x_i – значение аргумента (номера тренировки $N_{тр}$), y_i – соответствующие значения функции ОцТ, \bar{x} – среднее значение аргументов, \bar{y} – среднее значение функции, k – коэффициент наклона уравнения прямой, b – свободный член уравнения прямой. Среднее арифметическое значений функций и аргументов вычислялись по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (21)$$

Коэффициенты k и b определяются формулами:

$$k = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (22)$$

$$b = \bar{y} - k \cdot \bar{x} \quad (23)$$

В результате вычислений для количества точек $n=15$, средние значения равны $\bar{x} = 8, \bar{y} \approx 4,17$; $\sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) = 526,6$, $\sum_{i=1}^n x_i^2 = 1240$. Подставляя полученные данные в формулы (22) и (23) рассчитали $k \approx 0,1$, $b \approx 3,37$. Таким образом, приближающая прямая имеет вид $y = 0,1 \cdot x + 3,37$ и построена на рисунке 12:

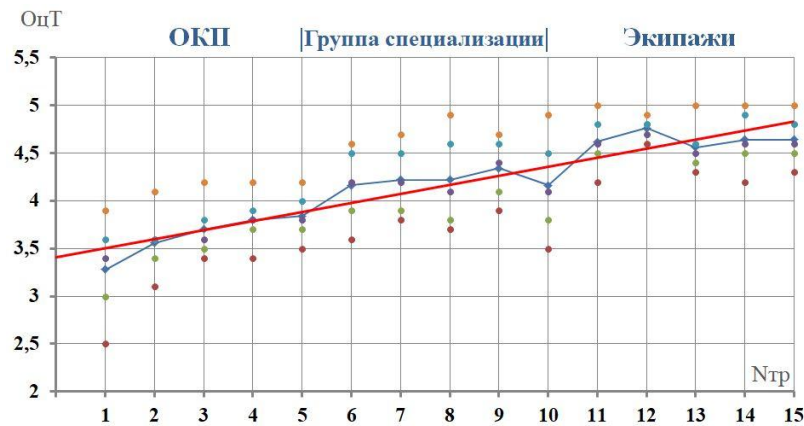


Рисунок 12 – Оценка операторской деятельности космонавтов (кандидатов в космонавты) на имитаторе УРМ ВИН

Для проверки достоверности построенной аппроксимации используется Критерий Пирсона. Коэффициент корреляции Пирсона определяется формулой:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (24)$$

Оценили достоверность коэффициента корреляции, используя эмпирическое значение коэффициента Стьюдента:

$$t = |r| \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \approx 10,8 \quad (25)$$

Полученный коэффициент корреляции Пирсона $r \approx 0,9486$, значение близко к 1, что подтверждает высокую точность аппроксимации. Для уровня значимости $\rho = 0,05$ и степени свободы $df = n - 2 = 13$, критическое значение критерия Стьюдента из таблицы $t_{крит} = t(0,05; 13) \approx 2,160$. Таким образом, $t > t_{крит}$, так как $10,8 > 2,160$ и на уровне значимости 0,05 делаем вывод о статистической значимости коэффициента корреляции. Это означает, что между переменными x и y существует сильная положительная линейная связь, и построенная линейная регрессия $y = 0,1 \cdot x + 3,37$ достоверна.

Полученный график соответствует динамике повышения качества деятельности космонавта, при увеличении среднего балла за работу с 3,5 до 4,8, что свидетельствует о повышении качества подготовки на 27%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана технология создания имитатора универсального рабочего места для решения задач ВИН. Использование созданного имитатора УРМ ВИН позволило сократить сроки выработки навыков ориентирования и выполнения деятельности ВИН на борту МКС за счет повышения качества подготовки на 27 % и повысить вероятность получения качественных снимков на 14 %, кроме того получены количественные данные, которые показывают предполагаемый положительный экономический эффект от использования в подготовке имитатора УРМ ВИН.

Проведенные в работе исследования находятся в русле требований ФКП РФ, предусматривающих создание после окончания эксплуатации МКС Российской орбитальной станции, предназначенной, в том числе, и для проведения *дистанционного зондирования* Земли средствами ВИН, включая Арктику и Северный морской путь, и формирование ПКК для будущих полетов к Луне и в дальний космос. В соответствии с Указом Президента РФ от 18.06.2024 № 529 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий", работа соответствует приоритетному направлению научно-технологического развития: «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов» и важнейшей наукоемкой технологии: «Технологии космического приборостроения для развития современных систем связи, навигации и дистанционного зондирования».

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе:

1 Проведен системный анализ процесса выполнения космонавтами программ ВИН на борту существовавших и современных ПКК, определены проблемные вопросы процесса ВИН на борту ПКК, разработаны предложения по разработке имитатора УРМ ВИН нового поколения для решения задач ВИН. Выполнена теоретическая формализация решаемой в работе научной задачи: для проектирования УРМ ВИН используется метод трехуровневого моделирования. Введены показатели параметрической адекватности и критерии эффективности, УРМ должно быть спроектировано с максимальными показателями качества и эффективности при существующих требованиях и ограничениях.

2 Разработана концептуальная модель класса *IS* предметной области процесса выполнения космонавтами мониторинга наблюдаемой поверхности с борта перспективных ПКК методами ВИН. Модель представляет собой сложную систему взаимодействия элементов: экипажа ПКК, бортовых систем, ЦУП и объектов наблюдения. Сформулированы основные ключевые этапы выполнения ВИН с борта ПКК. Впервые определены и представлены в работе аддитивные показатели каждого элемента и факторов, влияющих на процесс ВИН.

3 Для определения требований к создаваемой ЦВМ определены:

- ширина наблюдаемой поверхности и площадь сегмента наблюдаемой поверхности с высоты орбиты ПКК при разных углах обзора, с учетом кривизны наблюдаемой поверхности для создаваемого УРМ и перспективных УРМ (под РОС, лунный комплекс), выявлено, что для получения качественных фотоснимков, съемка должна выполняться в зоне ограниченной углом обзора $\pm 30^\circ$ (от направления в надири);
- разрешение ЗСЧ с высоты полета МКС для формирования требований к разрешению средства визуализации наблюдаемой поверхности создаваемого компьютерного имитатора УРМ ВИН;
- минимальное количество пикселей по ширине экрана, которым должно обладать средство визуализации имитатора УРМ для адекватного отображения подстилающей поверхности с высоты полета МКС.

4 Разработана цифровая модель визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта ПКК (логическая модель предметной области). Сформулированы требования к цифровой

модели Земли (должна быть основана на базе космофотоснимков, разрешение от 117 м/пиксел (для адекватного наблюдения с высоты $H_{\text{ПКК}}$) до 15 м/пиксел (для возможности детального наблюдения), сферичность, блики на водной поверхности, имитация положения Солнца, Луны, навигационных звезд, моделирование слоя облачности, дымки, ширина полосы наблюдаемой поверхности 827 км, обеспечено плавное изменение зума и ориентации ИИСНР относительно иллюминатора, плавная трансфокация при изменении угла зрения от 90° до 2° , отображение внешних и внутренних элементов станции, возможность регистрации деятельности оператора). Для создания ЦВМ Земли впервые определены и использованы современные компьютерные технологии: бесшовные карты, метод тайлов, метод Гильберта, внедрение трекеров, использование 4-х слойной визуализации, использование подсистемы подкачки и отображения, двухуровневая визуализация и трансфокация изменения угла обзора. На базе ЦМЗ создано СПО ЦВМ Земли (описанное в приложении Б).

5 Разработана структура имитатора УРМ проведения ВИН космонавтами с борта ПКК (физическая модель). Данные подходы, использованные при создании УРМ, применимы при разработке и создании тренажеров для подготовки космонавтов по перспективным космическим программам: для РОС и полетах к Луне.

6 На основе введенных показателей параметрической адекватности и критериев эффективности рассчитаны числовые значения введенных коэффициентов, позволяющие оценить качество и эффективность УРМ ВИН трех поколений (существующих и перспективных). Описано понятие идеального УРМ, для понимания к каким значения должны стремиться заданные показатели адекватности. В результате исследования экспертами (космонавты, имеющие опыт выполнения ВИН на борту ПКК и специалисты по ВИН) методом последовательных сравнений определены значения весовых коэффициентов, используемых в расчетах.

7 Впервые разработана методика ООД космонавта на имитаторе УРМ ВИН, которая включает в себя три параметра: полнота репортажа об объектах и выполняемых операциях, количество найденных объектов, качество фото регистрации объекта (качество сопровождения, компоновка кадра). Методика позволяет рассчитать количественный показатель по оценке работы оператора на УРМ ВИН по пяти бальной системе с точностью до десятых.

8 На основании разработанной методики на имитаторе УРМ ВИН проведены исследования с кандидатами в космонавты и космонавтами на всех трех этапах подготовки, по полученным данным исследования была построена оценочная кривая, которая затем была аппроксимирована методом наименьших квадратов (посчитаны среднее значение аргументов и функции, параметры линейной регрессии), что показывает повышение качества подготовки с использованием УРМ ВИН на 27% (средний балл увеличен с 3,5 до 4,8).

9 Показано повышение качества подготовки космонавтов за счёт использования УРМ ВИН, как следствие, сокращены сроки выработки навыков ориентирования и выполнения в полете задач ВИН космонавтами со среднестатистических 2-х месяцев до 3-х недель.

10 За счёт использования при подготовке космонавтов УРМ ВИН повышена вероятность обнаружения объектов наблюдения с борта членами экипажей МКС на 14%.

11 Рассчитан предполагаемый годовой экономический эффект от использования имитатора УРМ ВИН, который составляет 450 585 528 рублей при повышении качества подготовки на 27%, повышении вероятности получения качественных снимков на 14%, при этом затраты на создание имитатора УРМ ВИН составили 56 200 000 рублей.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты проведенных исследований использованы при выборе структуры УРМ ПКК в рамках проведения НИР, в которых автор являлся соисполнителем, при:

разработке эргономических требований к модулям РОС с учетом опыта эксплуатации космонавтами РС МКС;

разработке концепций развития перспективных средств и технологий в части отбора, подготовки и реабилитации космонавтов для реализации российских пилотируемых программ до 2040 года.

Результаты внедрены в процесс подготовки по ВИН экипажей с экспедиции МКС-60 (16 организационно-методических документов по подготовке космонавтов).

Результаты исследований использованы при проектировании имитатора УРМ ВИН 2021-2024 годы в рамках Госконтракта между ГК «Роскосмос» и ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» от 28 октября 2021 года № 2125730301691217000241041/041-7001Б/21/169 (Этап 6 п. 3.2.3.2.27 ТЗ Шифр ОКР: «МКС (Эксплуатация)» (Тренажёры-2)) и при проектировании (формирование ТЗ) перспективного УРМ ВИН в рамках Госконтракта на выполнение опытно-конструкторской работы для государственных нужд №2527730300591020160055041/041-РС036/25/59 от 26 мая 2025 года между ГК «Роскосмос» и ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (на 2026-2028 годы). Дальнейшее развитие УРМ ВИН предусматривает использование перспективных компьютерных технологий на основании разработанной ЦВМ.

Полученные результаты соответствуют пункту 3, 5 паспорта научной специальности 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в системе цитирования Scopus:

1 Kharlamov, M.M. Development Of A Multi-Segment Technology For Training Cosmonauts For Flight On The International Space Station / M.M. Kharlamov, O.I. Skripochka, V.N. Dmitriev, A.A. Kuritsyn, I.V. Kutnik, N.A. Chub, O.V. Blinov, D.A. Petelin, E.S. Yurchenko, E.V. Andreev // В сборнике: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. Сер. "IAF Human Spaceflight Symposium 2021 - Held at the 72nd International Astronautical Congress, IAC 2021" 2021 – Dubai, UAE, IAC Paper IAC-21,B3.5.2x65332. Conference Paper.

Научные статьи в журналах Перечня ВАК Минобрнауки РФ по специальности 2.5.13:

2 Васильева, Н.В. Проектирование стенда-тренажера для подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений / Н.В. Васильева, Е.В. Дедкова, И.В. Кутник, В.Е. Фокин, Н.А. Чуб, Е.С. Юрченко // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 115-125.

3 Юрченко, Е.С. Концептуальные основы построения тренажеров с применением технологий виртуальной реальности для отработки поисково-разведочных задач на поверхности Луны / Е.С. Юрченко, В.И. Васильев// Пилотируемые полеты в космос. 2023. № 4(49). С. 58-76.

4 Курицын, А.А. Подход к оценке степени важности направлений научно-прикладных исследований, проводимых на борту пилотируемых космических комплексов / А.А. Курицын, И.В. Кутник, Е.С. Юрченко // Пилотируемые полеты в космос. 2025. № 2(139). 17 С.

Научные статьи в журналах Перечня ВАК Минобрнауки РФ:

5 Дедкова, Е.В. Создание тренажёра по подготовке космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений с борта международной космической станции с применением современных информационных технологий / Е.В. Дедкова, Е.С. Юрченко, В.Е. Фокин// Пилотируемые полеты в космос. 2021. № 4(41). С. 48-56.

Публикации в научных изданиях:

6 Вагнер, И.В. Подготовка космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений земной поверхности / И.В. Вагнер, В.И. Васильев, Е.В. Дедкова, В.Е. Фокин, Е.С. Юрченко // Идеи и новации. 2022. Т. 10. № 1-2. С. 93-98.

7 Юрченко, Е.С. Опыт разработки и создания стенда-тренажера по подготовке космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений с борта РС МКС с применением современных информационных технологий / Е.С. Юрченко, Е.В. Дедкова // В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2021. – С. 119-121.

8 Васильев, В.И. Обоснование и разработка исходных данных специализированного тренажера виртуальной реальности для отработки задач ориентирования на поверхности Луны в ходе реализации лунных миссий / В.И. Васильев, Н.В. Васильева, Е.В. Дедкова, Е.С. Юрченко // В книге:

Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2021. – С. 117-119.

9 Курицын, А.А. Опыт организации и проведения учебно-тренировочных полётов космонавтов на визуально-инструментальные наблюдения объектов Крымского полуострова и Кавказского региона с использованием самолета-лаборатории ТУ-134ЛК / А.А. Курицын, В.И. Васильев, Е.В. Дедкова, С.Н. Максимов, В.Е. Фокин, Е.С. Юрченко // В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2021. – С. 123-124.

10 Вагнер, И.В. Особенности процесса подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений земной поверхности в ходе экспедиции МКС-63 поверхности / И.В. Вагнер, В.И. Васильев, Е.В. Дедкова, В.Е. Фокин, Е.С. Юрченко // Сборник материалов Десятого международного аэрокосмического конгресса IAC'2021, Москва, 2021, – С. 250-251.

11 Юрченко, Е.С. Опыт разработки, модернизации и эксплуатации стенда-тренажера «Тренажер ВИН» / Е.С. Юрченко // В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2023. – С. 208-210.

12 Дедкова, Е.В. Опыт организации и проведения контрольных тренировок на стенде «Тренажер ВИН» с использованием системы оценки операторской деятельности на этапе ОКП / Е.В. Дедкова, И.А. Шолохова, Е.С. Юрченко, С.Н. Максимов // В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2023. – С. 83-86.

13 Юрченко, Е.С. Разработка предложений по созданию специализированного тренажера виртуальной реальности для подготовки космонавтов к реализации напланетных миссий / Е.С. Юрченко, В.И. Васильев// В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2023. – С. 200-202.

14 Дедкова, Е.В. Опыт реализации учебно-тренировочных полетов космонавтов на авиационные визуально-инструментальные наблюдения объектов территории Российской Федерации / Е.В. Дедкова, И.А. Шолохова, В.И. Васильев, Е.С. Юрченко, С.Н. Максимов // В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. ФГБУ «НИИЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок, 2023. – С. 90-92.

15 Курицын, А.А. Пути повышения эффективности деятельности космонавтов при выполнении программ научно-прикладных исследований / А.А. Курицын, И.В. Кутник, Е.С. Юрченко // В книге: XLVII Академические чтения по космонавтике 2023. Сборник тезисов, посвященный памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. – М., 2023. – С. 404-405.

16 Юрченко, Е.С. Анализ возможностей систем, формирующих визуальное информационное пространство для тренажеров отработки задач напланетных миссий / Е.С. Юрченко, В.И. Васильев // В книге: К.Э. Циолковский и прогресс науки и техники в XXI веке. Материалы 59-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 2., – Калуга, 2024. – С. 188-192.