

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» МАИ

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»

**Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Курицын Андрей Анатольевич

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ КОСМОНАВТАМИ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ С БОРТА ПКК И ОПЫТА ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКОВ ВИН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	13
1.1 Анализ визуальных условий выполнения космонавтами задач мониторинга Земли с борта ПКК.....	13
1.2 Анализ деятельности космонавтов на борту ПКК при решении задач мониторинга Земли	26
1.3 Наземные технические средства формирования устойчивых навыков деятельности у космонавтов.....	31
1.4 Формализация и постановка задачи исследований.....	35
Выводы по Главе 1.....	41
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВИН С БОРТА ПКК.....	42
2.1 Рассмотрение элементов концептуальной модели предметной области процесса операторской деятельности космонавта и определение их взаимодействия при выполнении ВИН с борта ПКК.....	42
2.2 Расчет рабочих зон выполнения ВИН с порта ПКК	58
Выводы по Главе 2.....	60
ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ИМИТАТОРА УНИВЕРСАЛЬНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С БОРТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	62
3.1 Разработка цифровой модели визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта ПКК	62

3.2 Синтез структуры имитатора универсального рабочего места для решения задач визуально-инструментальных наблюдений с борта ПКК в виде видеостены	75
3.3 Синтез структуры имитатора универсального рабочего места для решения задач визуально-инструментальных наблюдений с борта перспективных ПКК с использованием технологии виртуальной реальности	79
3.4. Оценка показателей качества и эффективности имитатора УРМ ВИН.....	95
Выводы по Главе 3.....	103
ГЛАВА 4 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА ИМИТАТОРЕ УРМ ВИН	106
Выводы по Главе 4.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	124
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129
Приложение А Структура программы с описанием функций составных частей и связи между ними	144
Приложение Б Оценка качества имитатора УРМ ВИН	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Концепция российской пилотируемой космонавтики предусматривает создание перспективных пилотируемых космических комплексов (ПКК): 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 (ВИН).

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 (в том числе интересующие приполярные области);
- 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.

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.

Целью работы является разработка технологии создания имитатора универсального рабочего места (УРМ) для решения задач визуально-инструментальных наблюдений. Использование имитатора УРМ позволит повысить качество деятельности космонавтов на борту существующих и перспективных ПКК в части проведения геофизических исследований и мониторинга земной (в том числе Арктики и Северного морского пути) и лунной поверхности методами ВИН.

Для достижения цели сформулированы 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 модели (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 космонавта на имитаторе УРМ при формировании навыков проведения ВИН с борта перспективных ПКК.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке концептуальной модели предметной области, определении и описании аддитивных показателей каждого элемента и факторов, влияющих на выполнение ВИН, предъявлении требований к ЦВМ Земли (сферичность, регулируемая высота орбиты, имитация бликов, облачности, дымки, спецэффектов, плавная трансфокация, разрешение от минимального 117 м/пиксел до максимального 4 м/пиксел, имитация внешних и внутренних элементов станции), разработке структуры имитатора УРМ ВИН, определении и расчёте показателей качества и эффективности имитатора УРМ ВИН, разработке методики ООД на УРМ ВИН и проведении исследования на УРМ ВИН по данной методике.

Практическая значимость научных результатов диссертационной работы заключается в разработке ЦВМ Земли и уникального не имеющего аналога в мире компьютерного имитатора УРМ ВИН с использованием информационных технологий. Создание имитатора ВИН позволяет определять качественные и количественные характеристики рабочего места космонавта на борту перспективных ПКК, обеспечивать необходимое качество отработки деятельности космонавта к проведению геофизических исследований с борта ПКК, в том числе исследований полярных орбит, Арктики и Северного морского пути для решения народно-хозяйственных, оборонных, исследовательских задач и отработки технологий межпланетных полётов.

Экспериментальные работы, выполненные в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», подтвердили возможность имитации деятельности экипажей при проведении ВИН на борту орбитальных и лунных ПКК с применением современных информационных технологий. Полученные результаты внедряются в практику и лягут в основу предстоящих НИОКР по созданию

перспективных ПКК (включая РОС и Лунная программа), а также будут использованы при подготовке экипажей МКС, РОС, ПТК «Орел» и лунных экспедиций.

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, Бранеца 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 теоритических концепций и методов, анализом результатов полетов экипажей МКС с первой по 69-ю экспедицию [8, 9, 70, 80, 92], разработкой и внедрением методик экспериментальных исследований, использованием достоверных статистических данных и экспертных оценок, а также непосредственным вовлечением космонавтов в исследовательский процесс.

Апробация результатов исследования. Научные результаты диссертации представлены в 16 публикациях автора, включая 4 статьи в рецензируемых журналах Перечня ВАК (из них 3 – по специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»), 1 публикация в сборнике, индексируемом в международной базе данных Scopus. Основные положения работы доложены на следующих научных мероприятиях:

- 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 чтениях памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2024 г.;
- 72-м международном астронавтическом конгрессе, Дубай, 2021 г.;
- XLVII академических научных чтениях 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, 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.

Автор обладает профильной квалификацией в области тренажных средств и подготовке космонавтов к геофизическим исследованиям методами ВИН. Имеет непосредственный практический опыт проведения подготовки у 39 основных экипажей Международной космической станции.

Результаты исследования нашли практическое применение в ходе НИР при участии автора в качестве соисполнителя: они легли в основу выбора структуры УРМ ПКК. В частности, результаты использовались:

- при формировании эргономических требований к модулям РОС, базирующихся на анализе опыта эксплуатации РС МКС космонавтами;
- при разработке концепций развития перспективных технологий и средств для отбора, подготовки и реабилитации космонавтов, необходимых для реализации российских пилотируемых программ до 2040 г.

Дополнительно, результаты интегрированы в программу подготовки по ВИН, начиная с экспедиции МКС-60, что подтверждается разработкой 16

организационно-методических документов.

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

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

Структура диссертации: 4 главы и 2 приложения. Объем работы 167 страниц, включая 40 рисунков, 14 таблиц и 111 библиографических источников. Ключевые научные результаты: разработаны методические основы проектирования компьютерного УРМ с использованием современных информационных технологий. Доказано, что применение наземного имитатора УРМ ВИН повышает качество подготовки космонавтов к выполнения геофизических исследований методами ВИН на борту ПКК, позволяет оценить деятельность космонавта на имитаторе УРМ при формировании навыков проведения ВИН с борта перспективных ПКК, обеспечивает базу для разработки эргономических требований к модулям Российской орбитальной станции (РОС) с учетом опыта эксплуатации космонавтами РС МКС, формирует основу для предложений по развитию технологии отбора, подготовки и реабилитации космонавтов для реализации российских пилотируемых программ до 2040 года.

Разрабатываемые в ходе исследования технические средства подготовки космонавтов, основанные на современных информационных технологиях, соответствуют позиции 3.1.2. (подпункт 4) «Технологии разработки систем информационного обеспечения, методов и средств повышения эффективности процессов отбора и подготовки космонавтов, их деятельности на борту пилотируемых космических средств» Перечня критических технологий РФ (Раздел 3. Науки о жизни) [110]. Их создание осуществляется в рамках реализации Плана мероприятий по научно-технологическому развитию и

технологической модернизации экономики РФ, утверждённого 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"*).

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ КОСМОНАВТАМИ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ С БОРТА ПКК И ОПЫТА ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКОВ ВИН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

1.1 Анализ визуальных условий выполнения космонавтами задач мониторинга Земли с борта ПКК

Освоение космического пространства является одним из важнейших достижений человечества. Еще в самом начале космической эры никто даже не мог предположить, какой объём информации о Земле можно будет получить с высоты полёта орбитальной станции. Исследования Земли из космоса фактически начались с полета Ю.А. Гагарина на ПКК «Восток». Далее наблюдение и съёмка Земли выполнялись на всех ПКК [49].

Первый этап развития космического метода исследований характеризовался получением телевизионных и фотографических снимков низкого разрешения, так как использовалась техника, недостаточно приспособленная к космическому полёту, а наблюдения проводились невооруженным глазом. Тем не менее, даже эта информация, успешно применялась для научных исследований и решения ряда задач. По мере развития технического прогресса появилась возможность выполнять детальную съёмку земной поверхности и визуальные наблюдения за различными объектами, процессами и явлениями с помощью различной аппаратуры. Особенно большое значение ВИН играют для выполнения наблюдений за динамически меняющимися объектами, катастрофическими процессами и явлениями и их прогнозирования. По сути, ВИН это неотъемлемая составляющая глобальной системы экологического мониторинга за состоянием окружающей среды и комплексной оценки состояния территорий, рисунок 1.1 [49].

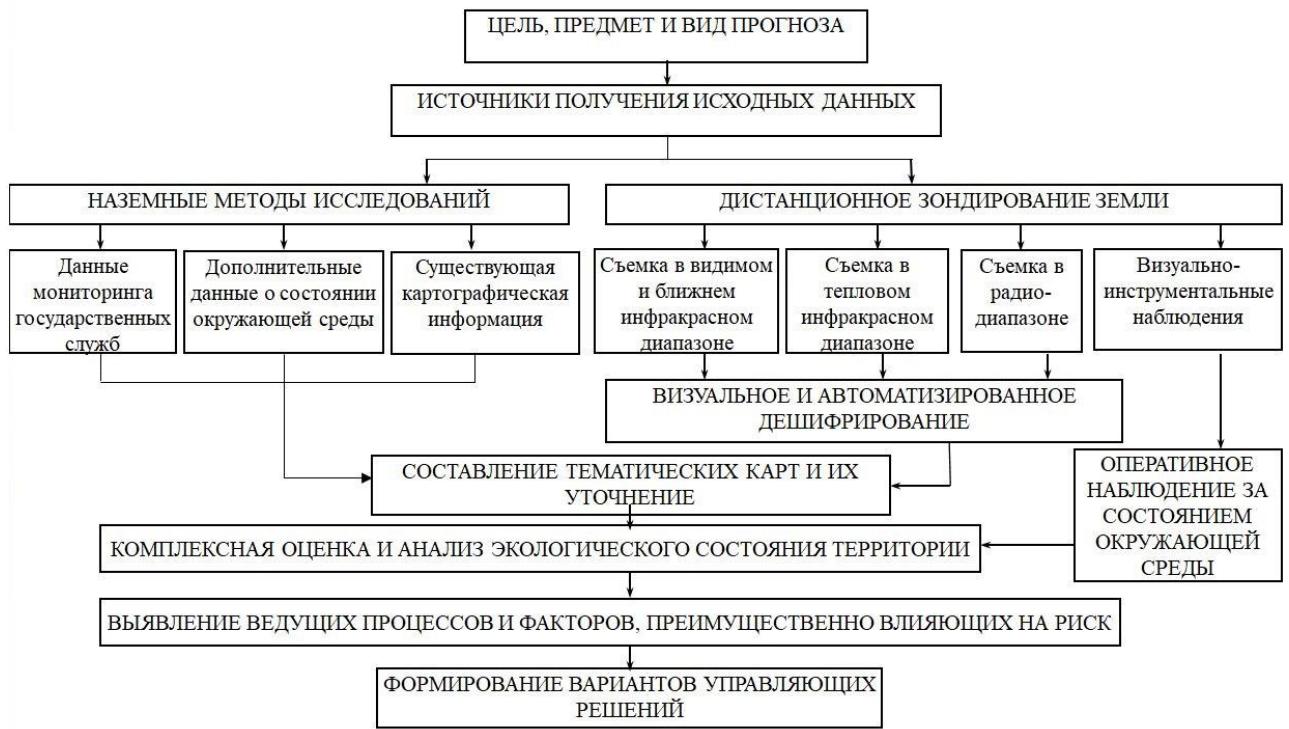


Рисунок 1.1 – Схема комплексной оценки экологического состояния территории

Научные эксперименты занимают порядка 40% общего рабочего времени космонавта на борту РС МКС. В рамках направления «Исследования Земли и космоса», включающего геофизические эксперименты и мониторинг Земли с борта РС МКС методом ВИН, на эти работы приходится около 60% всего времени, отведенного на научно-прикладные исследований и эксперименты на РС МКС (рисунок 1.2). Ключевые эксперименты данного направления: «Ураган», «Дубрава», «Сценарий», «Экон». Динамика временных затрат экипажей разных экспедиций на эксперименты по исследованию Земли из космоса представлена на рисунке 1.3 [11, 21, 103].

Космический эксперимент «Ураган» направлен на экспериментальную отработку системы наземно-космического мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. Основной целью КЭ «Ураган» является наблюдение и регистрация катастрофических явлений с борта РС МКС, а также

разработка критериев для их классификации и дешифрирования признаков. В рамках КЭ «Дубрава» ведется мониторинг лесных экосистем.

Научно-прикладные исследования и эксперименты



Рисунок 1.2 – Процентное отношение времени, затраченного на выполнение КЭ по направлению «Исследование Земли из космоса»

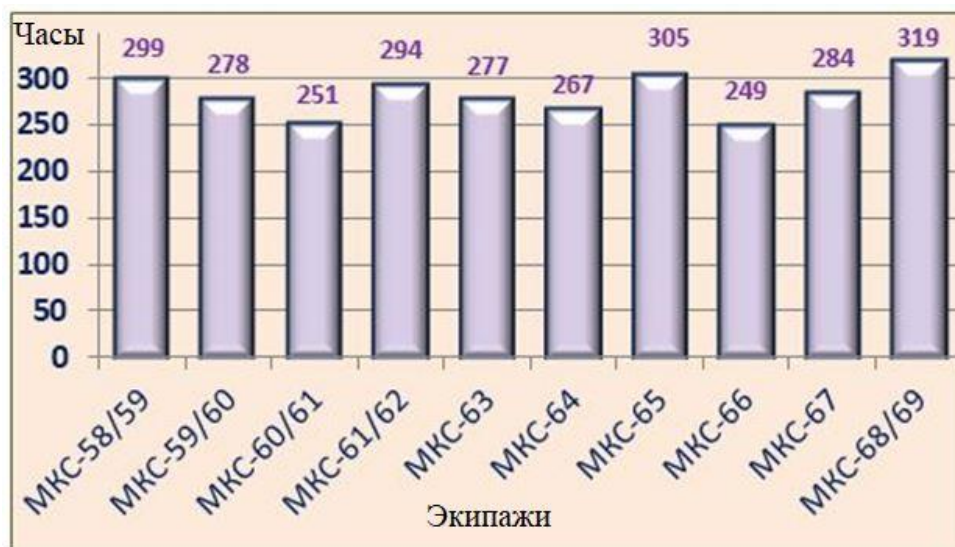


Рисунок 1.3 – Количество часов, затраченных на КЭ, по направлению «Исследование Земли из космоса» по экспедициям МКС

Целью КЭ «Дубрава» является отработка методов лесной инвентаризации, а также определение воздействия природных, техногенных факторов и лесохозяйственной деятельности человека на лесной покров. КЭ

«Сценарий» нацелен на отработку методов оценки развития катастрофических и потенциально опасных явлений посредством наблюдения земной поверхности и атмосферы. КЭ «Экон» заключается в наблюдении территории Российской Федерации и зарубежных государств, с целью экологического мониторинга районов деятельности человека. На рисунке 1.4 представлены фото космонавтов, выполняющих КЭ, связанные с исследованием Земли из космоса.



Рисунок 1.4 – Выполнение космонавтами КЭ по направлению «Исследование Земли из космоса».

ВИН являются особой деятельностью космонавтов на борту ПКК. Экипаж может выполнять их как по целеуказаниям с Земли (в рабочее время), так и по собственной инициативе в свободное время (по task-листу). Основное назначение ВИН – мониторинг природных и антропогенных объектов, явлений, происходящих на Земле, в космосе, атмосфере и океане (циклоны, тайфуны, извержение вулканов, грозы, лесные пожары, биопродуктивность океана, микрометеориты и т.д.).

По сравнению с другими методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), ВИН обладает рядом преимуществ, приведенных на рисунке 1.5 [17].

1 Обзорность. С орбитальной высоты 400 км, при условии ограничения зоны наблюдения углом 45° от надира, обеспечивается круговая зона обзора радиусом порядка 413 км. Данная зона видимости создает оптимальные условия для выполнения экипажем всего спектра поисковых задач, связанных с исследованием разнообразных природных объектов и явлений.



Рисунок 1.5 – Преимущества ВИН

2 Оперативность. Экипаж способен решать задачи по исследованию, подготовке и наведению аппаратуры с минимальными временными затратами. Это критически важно при изучении непрогнозируемых заранее, быстротекущих природных явлений. Чаще всего съемку таких явлений экипаж выполняет по собственной инициативе, проявляет творческое участие в развитии новых методов космических исследований, существенно расширяя спектр решаемых в полете задач.

Космонавтам нередко удастся наблюдать новые неизученные, а потому не включенные заранее в программу ВИН, природные явления, которые представляют значительный научный интерес и практическую ценность для различных областей науки и техники.

3 Универсальность. Результаты космических наблюдений находят применение во многих отраслях народного хозяйства. Например, проводя наблюдения акватории Мирового океана с борта ПКК, космонавт одновременно обеспечивает полезной информацией множество заинтересованных организаций: океанологов, экологов, специалистов рыбного хозяйства, метеорологов.

4 Генерализация. В процессе ВИН космонавт осуществляет обобщение деталей мелкого масштаба с последующим выявлением основных закономерностей и характера их взаимосвязи в рамках наблюдаемого сюжета.

5 Селективность. Возможность выделения из множества объектов наиболее важных по характерным индикационным признакам, которые известны наблюдателю заранее.

6 Устойчивость к помехам. Способность извлечения полезной информации в условиях широкого спектра световых помех.

7 Гибкость. Возможность оперативной смены приоритетов исследований в ответ на возникновение неблагоприятных условий наблюдения (например, облачность), делающих невозможным или неэффективным выполнение заранее запланированных исследований.

Задачи ВИН [9, 98]

С борта МКС ведутся детальные оптические дистанционные измерения физических параметров поверхности Земли и её атмосферы. Эти данные предназначены для фундаментальных научных исследований, разработки моделей, описывающих формирование климата и экологические процессы, а также их практическое внедрение.

Программа ВИН природной среды и катастрофических явлений, осуществляемых на борту РС МКС, включает задачи [98, 99, 105]:

- 1 Мониторинг воздействия негативных техногенных факторов на наземные ландшафты.
- 2 Мониторинг катастроф природного и техногенного характера.
- 3 Оперативное информирование соответствующих организаций о неблагоприятном или катастрофическом развитии событий.
- 4 Мониторинг акваторий Мирового Океана.
- 5 Отработка методов наблюдения в условиях реальных ограничений.

С целью выполнения перечисленных задач космонавтом-оператором выполняется:

- по указаниям Центра управления полетом (ЦУП) отслеживание заданных объектов с использованием бортовых средств наблюдения и регистрации;
- поиск и обнаружение заданных объектов на земной поверхности по их типовым характерным признакам;
- оперативная корректировка программы ВИН объектов в случае возникновения факторов, ухудшающих выполнение наблюдений;
- обработка и сброс результатов наблюдений на Землю;
- оперативный анализ текущего состояния природных явлений и экосистем в интересах развития народного хозяйства и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

В рамках мониторинга состояния природных явлений и катастрофических процессов изучаются следующие объекты и процессы [49]:

- система «растительность-почва» (состояние, влияние антропогенных и климатических факторов);
- лесные пожары (прогноз, обнаружение, оценка последствий);
- изменения в результате урбанизации, рекреации, землепользования, обезлесения, опустынивания и заболачивания земель;
- рельефообразующие процессы (эрозионные процессы, перенос и

осаждение осадочных пород, вулканизм);

- загрязнение и динамика снежного покрова и ледников;
- влияние климатических и антропогенных факторов на изменения в окружающей среде;
- состояние гидрологических объектов (речные наводнения, быстрые затопления морских побережий, колебания уровня озер, внутренних морей, перемещения русел рек, содержание хлорофилла и взвесей, первичная продуктивность, загрязнения, тепловой режим);
- водно-тепловой режим атмосферы и динамические явления в атмосфере (конвекция, горизонтальный перенос, циклоны, внутренние волны);
- антропогенное воздействие (загрязнения природных сред, опустынивание, обезлесивание, эрозия и засоление почв, пожары, формирование существенно неблагоприятной экологической обстановки в результате аварий на АЭС, дамбах, плотинах, водохранилищах и др. крупных объектах).

Процесс ВИН из космоса включает операции наблюдения объектов подстилающей поверхности, как невооруженным глазом, так и при помощи оптических средств, расширяющих возможности зрительного анализатора космонавта. В качестве регистратора результатов ВИН земной поверхности используются цифровые зеркальные фотоаппараты Nikon D5, Nikon D850 и цифровой беззеркальный фотоаппарат Nikon Z5, с телеобъективами AF-S Nikkor 600 мм f/4, AF-S Nikkor 800 мм f/5,6, с телеконверторами Nikon TC-20E, Nikon TC800-1.25E и адаптером Nikon FTZ II (рисунок 1.6). Для учета условий проведения сеанса наблюдения используется программное обеспечение баллистико-навигационного отображения полетной ситуации «Сигма» (ПО БНО «Сигма»). Для получения спектрометрических данных исследуемых районов используется научная аппаратура НА ФСС, НА ВСС, НА СОВА, НА ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР (рисунок 1.7). Для получения снимков высокого разрешения с мгновенной координатной привязкой, используется НА СКПФ УМ (рисунок 1.8) [12].

Цифровые фотокамеры



Nikon D5



Nikon Z9



Nikon D850

Телеобъективы



AF-S Nikkor 600 мм f/4



AF-S Nikkor 800 мм f/5,6

Телеконверторы



Nikon TC-20E



Nikon TC800-1.25E

Адаптер



Nikon FTZ II

Рисунок 1.6 – Фотоаппаратура на борту РС МКС
для выполнения задач ВИН



НА ФСС



НА СОВА



НА ВСС



НА Гиперспектрометр

Рисунок 1.7 – Научная аппаратура на борту РС МКС
для выполнения задач ВИН

В структуре деятельности экипажей РС МКС по наблюдению земной поверхности методами ВИН могут быть выделены две составляющие – визуальная и операторская. Визуальная составляющая – основана на выполнении операций поиска невооруженным глазом, обнаружения и идентификации объектов наблюдений. Операторская составляющая – включает операции по управлению и обслуживанию приборов для регистрации наблюдений, используемых в процессе ВИН.



Рисунок 1.8 – Научная аппаратура СКПФ–УМ на борту РС МКС
для выполнения задач ВИН

Общие принципы ориентирования на местности с борта ПКК [49]

Для выполнения задач ВИН экипажу необходимо в режиме реального времени понимать местоположения ПКК относительно Земли. Это позволяет космонавтам спрогнозировать время пролёта над изучаемым объектом и заблаговременно подготовить аппаратуру и средства наблюдения к работе.

Существуют три методики ориентирования: непрерывное, пунктирное (фрагментно-непрерывное) и точечное.

При непрерывном ориентировании космонавт непрерывно следит за своим местоположением, перемещаясь от одного ориентира к другому. В поле зрения космонавта при наблюдении с борта ПКК находится достаточно обширный участок местности, поэтому выбор естественных или искусственных ориентиров не составляет особых трудностей. Задачей космонавта является удержание взглядом выбранного ориентира, вовремя наметить и переключиться на следующий ориентир по маршруту движения ПКК.

При пунктирном ориентировании космонавт отслеживает свое местоположение лишь на отдельных отрезках своего движения. Данная методика ориентации используется в случае, когда маршрут пролегает через очень характерные природные и антропогенные зоны. В данном случае наблюдение не представляет особой трудности, лишь эпизодически определяя свое местоположение, достаточно быстро узнать район полета и по характерным ориентирам точно определить объект наблюдения.

При точечном ориентировании космонавт лишь в целом представляет район своего местоположения. Его задача – найти различимые на местности ориентиры, обладающие характерными чертами, которые позволяют уточнить местоположение изучаемого объекта. Эта задача – наиболее сложная из всех перечисленных, требует от космонавта хороших теоретических знаний характерных черт антропогенных и природных объектов и хорошо отработанных практических навыков по методике ориентирования и умению работать с картами, космическими фотоснимками, которые имеются на маршруте движения ПКК.

При всех используемых методиках ориентирования главным способом ориентации является способ приближения по принципу «от общего к частному», от крупных ориентиров к более мелким, позволяющим опознать конкретный объект наблюдения. Способ приближения является

универсальным, его использование невозможно без использования карт или фотоизображений и определенных географических знаний на местности.

Вторым, упрощенным способом ориентации, является способ перехода от одного ориентира к другому. При способе перехода либо составляется карта ориентиров, либо на имеющихся карте или снимке намечаются характерные ориентиры, таким образом, чтобы следующий ориентир был виден с места расположения предыдущего.

Ориентиры могут быть природные (естественные) и антропогенные (искусственные) [49].

К главным природным ориентирам относятся элементы орографии, гидрографии, растительного и почвенного покрова, их размеры, взаимосвязи между собой и другие различимые на местности признаки, позволяющие легко узнать и классифицировать их.

К главным антропогенным ориентирам относятся населенные пункты, транспортная сеть, линии электропередач и т.д.

Качественный и количественный состав ориентиров, особенно природных, определяется природно-географическими зонами и рельефом.

Выполняя задачи ВИН важно знать основные элементы местности природного и антропогенного происхождения: рельеф, водоемы, расположение и направление течения рек, транспортные магистрали, городские агломерации и другие объекты, имеющие характерные форму, размеры и направление. Знание расположения на земной поверхности основных естественных и искусственных ориентиров позволяет, используя способ приближения при ориентации, достаточно уверенно определить в начале работы свое местоположение, а затем, по конкретным ориентирам, найти местоположение изучаемого объекта.

Последовательность ориентирования с борта [12]:

- 1 По крупным ориентирам, определяется примерный район местоположения ПКК, которое уточняется по картам и космическим изображениям. К крупным ориентирам относятся: направление горных

хребтов, форма береговой линии водоемов, течения крупных рек, конфигурация их русла, сеть оврагов и балок, степень освоенности территорий, крупные населенные пункты, линейные объекты (дороги) и другие.

2 По более мелким ориентирам устанавливается точное местоположение объекта. К мелким ориентирам относятся: детали рельефа, растительного покрова, изгибы дорог, мосты и другие конкретные естественные и искусственные ориентиры. Для приобретения теоретических и практических навыков ориентирования на местности требуется проведение тренировочных занятий по отработке приемов ориентирования в разных природно-географических зонах на примере специально подобранных тестовых участков, отражающих разнообразие естественных и искусственных обстановок, которые наиболее часто встречаются на поверхности Земли.

Одним из основных проблемных вопросов касаемый ВИН с борта МКС на сегодняшний день, следующий – с МКС можно наблюдать только 80% (рисунок 1.9) земной поверхности, причем территорию России видим только на 25% и нет возможности наблюдать интересующие нас приполярные области (рисунок 1.10).

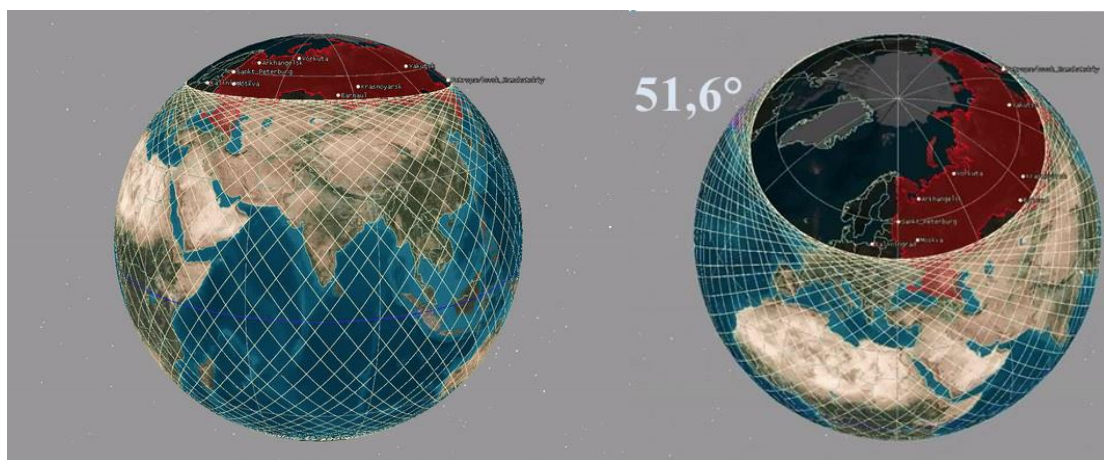


Рисунок 1.9 – Обзор с борта РС МКС

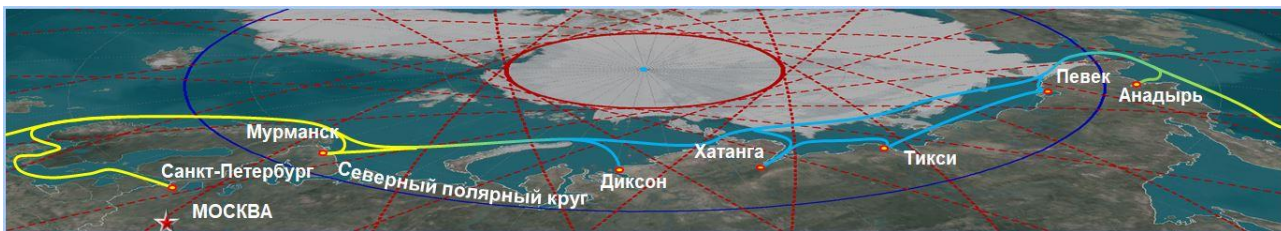


Рисунок 1.10 – Необходимые для наблюдения территории в интересах Северного морского пути и полярных экспедиций

Кроме того в перспективе планируется создание РОС, одной из основных целей которой будет исследование поверхности Земли.

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 наблюдений приполярных и арктических областей.

1.2 Анализ деятельности космонавтов на борту ПКК при решении задач мониторинга Земли

Структура деятельности ВИН космонавта в космическом полете

Анализ деятельности космонавтов показал, что операцию ВИН можно разделить на три фазы, каждую из которых можно разложить на ряд логически завершённых действий – процедур, представленных на рисунке 1.11.

Особенности процесса становления навыков космонавтов к выполнению ВИН с борта МКС

Визуально-инструментальное наблюдение Земли из космоса является одним из наиболее информативных методов дистанционного зондирования Земли, используемых на борту ПКК. Для эффективного выполнения ВИН на борту, требуется получение космонавтами специальных навыков на Земле [99, 101].

В настоящее время учебно-тренировочный процесс, направленный на формирование деятельности космонавтов по программам космического землеведения, включает в себя приобретение знаний по теоретическим основам экспериментальных исследований по актуальным проблемам наук о Земле и приобретение необходимых навыков и умений по практическому применению бортовой аппаратуры ДЗЗ.

Первая фаза (выполняется до входа в рабочую зону)	Вторая фаза (рабочая зона)	Третья фаза (выполняется вне рабочей зоны)
получение радиограммы и уяснение задачи по тексту на экране монитора	ведение репортажа о выполнении процедур ВИН	копирование цифровых снимков в ПК
изучение района расположения объекта и планирование сеанса ВИН	обнаружение географических ориентиров невооруженным глазом	оперативная компьютерная обработка снимков
подготовка аппаратуры к наблюдению и съемке	обнаружение объектов-реперов	экспресс-доклад по радиоканалу
	захват района расположения объекта на сопровождение	формирование пакета данных
	переход на режим детального наблюдения	формирование и сброс по каналу связи пакета данных
	обнаружение и опознавание заданного объекта	
	наведение и захват объекта на сопровождение	
	синхронизация движения линии визирования аппаратуры наблюдения и съемки	
	оперативное дешифрирование и оценивание функционального состояния объекта	
	компоновка кадра, выбор информационной зоны и точки прицеливания	
	фокусировка объектива	
	экспозамер (при необходимости) в «тнях» и «светах»	
	прецизионное наведение оптической оси в центр информационной зоны	
	фотографирование заданного объекта	

Рисунок 1.11 – Фазы операции ВИН

Анализ результатов выполнения космических полетов и результаты опросов космонавтов, имеющих опыт космического полета, показывают, что космонавты без опыта космических полетов приобретали полноценные навыки

выполнения ВИН только на второй месяц космического полета. В таблице 1.1 приведены временные затраты экипажей МКС-27 – МКС-29 во время поиска и регистрации объектов наблюдения. По итогам опроса членов экипажей МКС выявлены факторы, обуславливающие увеличение времени поиска объекта, которые приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Временные характеристики этапов поиска и видеосъемки объектов наблюдения в КЭ «Ураган»

	Наименование объекта	Время поиска, сек	Время регистрации, сек
1	Изгиб русла реки	25	1
2	Широкая пойма реки	32	12
3	Район прибрежных вод	9	14
4	Озеро в горной местности	6	10
5	Русло реки	20	26
6	Прибрежная часть озера	55	20
7	Пойма реки	40	10
8	Высокогорное озеро	12	1
9	Аэродром	11	2
10	Изгиб реки	30	11
11	Изгиб реки с ярко выраженной обширной поймой	30	4
12	Плотина	25	4
13	Город	40	12

Основные принципы и формы формирования навыков у космонавтов [27]

Для эффективного поиска объектов на Земле космонавту необходимы навыки дешифрирования изображений земной поверхности. Их отработка возможна на специализированном тренажном средстве, моделирующем визуальную обстановку полёта РС МКС с разрешением на местности не менее 2–4 м.

Для выполнения операций ВИН космонавт должен уметь:

- планировать сеансы наблюдения на борту ПКК с использованием бортового информационного обеспечения;
- организовывать деятельность на борту ПКК при выполнении операции ВИН;
- оценивать условия наблюдения в текущем времени;
- свободно осуществлять поиск объектов (в том числе подвижных) в заданном районе;
- осуществлять поиск заданного объекта с известным местоположением в зоне радиусом порядка 400 км;
- обнаруживать объект в условиях наличия облаков в поле зрения средства наблюдения;
- использовать сменные объективы;
- выбирать режим и области фокусировки и экспозамера;
- использовать ручную фокусировку в условиях, когда автоматическая фокусировка работает с ошибками или вообще не работает;
- осуществлять раздельную реализацию экспозамера в светах и тенях;
- осуществлять съемку одного сюжета в режиме экспозиционной вилки по замерам в светах и тенях;
- проводить экспресс-обработку полученных снимков на борту ПКК;
- передавать информацию по различным каналам связи.

Одним из основных проблемных вопросов выполнения ВИН космонавтами с борта МКС на сегодняшний день является то, что на начальном этапе полета космонавты испытывают трудности с поиском и обнаружением объектов наблюдения, особенно в первом космическом полёте, это связано с тем, что на Земле трудно симитировать реальную визуальную полетную обстановку, а также время, отведенное на поиск и определение объекта, которое составляет несколько секунд. На выработку навыков ориентирования для выполнения качественной работы у

космонавтов уходит 2–3 месяца, что очень много, учитывая длительность их экспедиции около полугода [12].

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.

Таблица 1.2 – Факторы, обуславливающие увеличение времени поиска объекта

Условия наблюдения и ограничения	Факторы
Фоноцелевые условия	- наличие яркостного стимула-помехи (блик); - облачность любого типа; - наличие протяженного контрастного сопутствующего фонового объекта (дельта реки, граница лесного массива); - насыщенность сцены близкими по контрасту, равновеликими и равномерно распределёнными фоновыми объектами (поля, лесные угодья, чередующиеся склоны и т.п.)
Технические ограничения	- ухудшение частотно-контрастных и цветовых характеристик сцены в видеоискателе средств регистрации; - резкое уменьшение угла поля зрения при переходе от наблюдения через иллюминатор к наблюдению с помощью средства ВИН; - наличие в поле зрения элементов конструкции компоновки модулей орбитальной станции; - отсутствие возможности визуализации изображения на видеоконтрольном устройстве с учетом эргономических особенностей восприятия информации с экрана монитора; - неудобная для ВИН ориентация ПКК
Информационное обеспечение	- отсутствие маркера целеуказания объекта; - низкая точность целеуказания экипажу, выражающаяся только в сообщениях ему времени прохождения и удалении (линейном угловом) объекта на траверзе; - отсутствие бортовой информационно-справочной системы по географическим ориентирам.

1.3 Наземные технические средства формирования устойчивых навыков деятельности у космонавтов

Многолетний опыт подготовки космонавтов на технических средствах показывает, что эффективность обучения во многом зависит от того, насколько точно тренажер моделирует визуальные условия реальной работы. Это объясняется ключевой ролью зрительного восприятия внешней среды при выполнении экипажами ПКК задач в полёте. Поэтому система имитации внешней визуальной обстановки (СИВО) – критически важный компонент космического тренажера.

За многолетний период эксплуатации орбитальных станций «Мир» и МКС отечественное тренажеростроение приобрело практический опыт разработки и эксплуатации СИВО, применяющих широкий спектр методов и средств моделирования внешней визуальной обстановки. Анализ специфики выполнения экипажами задач ВИН на борту ПКК и особенности моделирования визуальной обстановки на космическом тренажере показывает значительную сложность в обеспечении адекватности тренажных моделей визуальной обстановки реальным условиям деятельности космонавтов. В настоящее время существенно возросли функциональные возможности СИВО, а также повышена полнота и точность воспроизведения визуальных условий профессиональной деятельности экипажей на космическом тренажере при отработке навыков взаимодействия с бортовыми системами и оборудованием ПКК.

Первые СИВО включали оптико-механические и оптико-телевизионные формирователи изображений, моделирующие визуальную обстановку для конкретных приборов наблюдения. В этих имитаторах функции создания и отображения картинки были объединены. Такие системы визуализации были довольно громоздкими и сложными в эксплуатации. Ключевым элементом визуализации была аэрокосмическая фотопленка,

непрерывнодвигающаяся в панорамном обзорном устройстве с орбитальной скоростью.

Первым оптико-механическим тренажером, являлся тренажер «Тополь», который был создан в конце 90-х годов. Данный тренажер использовался для получения навыков в наземных условиях по работе оптическим визиром типа ОД, это приборы которые использовались для наблюдения на станциях «Алмаз», «Салют», «Мир». Система визуализации тренажера была представлена фотопленкой малых и больших увеличений, при больших увеличениях можно было выполнять фотографирование. На сегодняшний момент тренажер «Тополь» находится в рабочем состоянии, но законсервирован в связи с отсутствием на МКС соответствующего штатного прибора.

Далее был создан функциональный моделирующий стенд «Геосфера», система визуализации которого была представлена картографической моделью Земли. Использовались карты масштабом 1см:200км, 1см:100км, 1см:50км. В начале 2000 года была проведена модернизация стенда «Геосфера», путем замены системы визуализации на цифровую сканерную модель масштаба 1см:30км. Средством визуализации являлся телевизор, который висел на стене. После модернизации моделирующий стенд стал называться «Глобарий». Модель позволяла имитировать полет по 48 суточным виткам и работать с объектами детального наблюдения в количестве до 50 штук. Объекты детального наблюдения имитировались в качестве вставок в цифровую модель с разрешением 10 метров.

Все вышеперечисленные тренажеры устарели и обладали рядом недостатков такими как: несоответствие реальности имитируемого изображения, не выполняется эффект присутствия из-за отсутствия ограничения поля зрения иллюминаторов, ограниченное количество объектов детального наблюдения.

Существенные изменения произошли, когда в структуре СИВО тренажеров ПКК в качестве формирователей изображения начали широко

применяться компьютерные генераторы изображений. Метод компьютерной генерации изображения базируется на принципах мультимедийной картографии. Суть метода заключается в том, что основа системы визуализации – компьютерный генератор, который формирует видеокартинку по заданной математической модели. Эта модель представляет участок земной поверхности через его полигональную аппроксимацию.

Прогресс в информационных технологиях позволил создавать цветные 3D изображения динамических сюжетов внешней визуальной обстановки, управляемые в реальном времени вычислительной системой тренажера. Первой реализацией этого подхода к СИВО стал тренажер СМ РС МКС. Его пятиканальная система компьютерной генерации изображения Альтаир формировала изображение визуальной обстановки (включая земную поверхность с разрешением 1км/пиксел, что не соответствует разрешению человеческого глаза) для наблюдательных приборов. Метод моделирования, реализованный на данном тренажере – повитковый, то есть такое моделирование не позволяет охватить всю территорию, необходимую для наблюдения поверхности, и нет возможности наблюдать межвитковое пространство. Облачность моделировалась в пяти фиксированных вариантах плотности путем модификации основной текстуры, что требовало хранения пяти отдельных полных текстур Земли, различающихся только облачным покровом. При этом отсутствовало моделирование теней от облаков и не возможно сдвигать облака относительно наблюдаемых объектов.

В 2011 году началась разработка «Тренажера ВИН» (рисунок 1.12), с целью формирования у космонавтов устойчивых навыков по решению задач ВИН и мониторинга Земли с борта РС МКС. Тренажер предназначен для отработки экспериментов, предусмотренных программой полета МКС (таких как «Ураган», «Экон», «Релаксация», «Сейнер», «Русалка») и других перспективных программ научно-прикладных исследований.



Рисунок 1.12 – Зона тренировки стенда «Тренажер ВИН»

«Тренажер ВИН» состоит из трех рабочих зон [11]:

- зона тренировки;
- лекционная зона;
- методическая зона.

Средство визуализации тренажера расположенное за ширмой с имитатором иллюминатора, позволяет имитировать внешнюю визуальную обстановку при обзоре полосы 800 км с разрешением 350 метров для невооруженного глаза (что не соответствует условию адекватности имитируемого изображения). В специальном программном обеспечении имитации внешней визуальной обстановки, реализована возможность наложения облачности и дымки разного уровня.

Современный уровень развития компьютерной графики и мониторов позволяет имитировать земную поверхность с разрешением сопоставимым реальным условиям наблюдения с борта ПКК. Подтверждается тем самым возможность создания имитатора универсального рабочего места космонавта на борту ПКК для решения задач ВИН.

1.4 Формализация и постановка задачи исследований

Задача исследования состоит в разработке технологии создания имитатора УРМ для формирования устойчивой деятельности ВИН с борта перспективных ПКК 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 обеспечения максимальной эффективности УРМ космонавта для отработки деятельности ВИН необходимо выполнение следующих рекомендаций:

- использовать информационные технологии, которые соответствуют современным требованиям по разрешению, производительности и качеству воспроизведения информации;
- максимально учесть все факторы, влияющие на качество выполнения ВИН;
- использовать средства регистрации изображения;
- отрабатывать навыки и умения по работе с научным оборудованием;
- использовать научное оборудование разных весовых категорий;
- предусмотреть систему позиционирования;
- предусмотреть возможность отработки операций ВИН с использованием навигационной системы.

С учетом анализа действий космонавтов при выполнении ВИН требованиями к проектированию компьютерного имитатора УРМ ВИН являются:

- адекватность воспроизведения интерьера рабочего места;
- адекватность имитации (визуализации) внешней обстановки;

- адекватность восприятия информации обучаемым оператором;
- адекватность органов управления;
- управляемость параметрами имитируемой рабочей среды и внешней обстановки;
- управляемость параметрами функционирования имитируемого технического средства;
- гибкость перестройки на выполнение типовых задач;
- математическое моделирование процесса функционирования технического средства;
- регистрация управляющих действий обучаемого оператора;
- регистрация ошибок функционирования объекта в результате действий обучаемого (ошибки наведения и др.);
- регистрация глазодвижительной деятельности обучаемого оператора;
- использование математической эталонной модели человека-оператора в задаче ВИН;
- обеспечение возможности самоконтроля действий обучаемого;
- автоматизированная оценка качества деятельности обучаемого оператора;
- архивация данных тренировок.

Теоретическая постановка задачи

Теоретические основы проектирования составляют методологическую базу для построения компьютерных информационных систем [3, 34]. Предметная область – это организационная структура (или её элементы), задачи которой решаются разрабатываемой компьютерной системой. Для того, чтобы УРМ ВИН полностью покрывал информационные потребности пользователей предметной области, он должен непрерывно отображать динамику процессов в этой области. В проектировании компьютерных систем широко применяется методология трехуровневого моделирования

данных [3], включающая:

- концептуальную модель предметной области;
- логическую модель предметной области;
- физическую модель.

Проанализировав визуальные условия выполнения космонавтами задач мониторинга поверхности с борта ПКК, учитывая все недостатки орбитальных комплексов МИР, МКС и имеющихся технических средств в системе формирования деятельности ВИН на основании отчетов экипажей о проделанной работе на ПКК и получении опыта становления навыка ВИН, необходимо разработать методические основы проектирования имитатора УРМ ВИН:

- модель процесса выполнения космонавтами мониторинга наблюдаемой поверхности с борта перспективных ПКК методами ВИН;
- математическую цифровую модель визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта перспективных ПКК;
- структуру и составные части имитатора УРМ проведения ВИН;
- методику оценки операторской деятельности на имитаторе УРМ ВИН.

Схема организации и проведения исследования представлена на рисунке 1.13. В работе для проектирования имитатора УРМ используется 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.

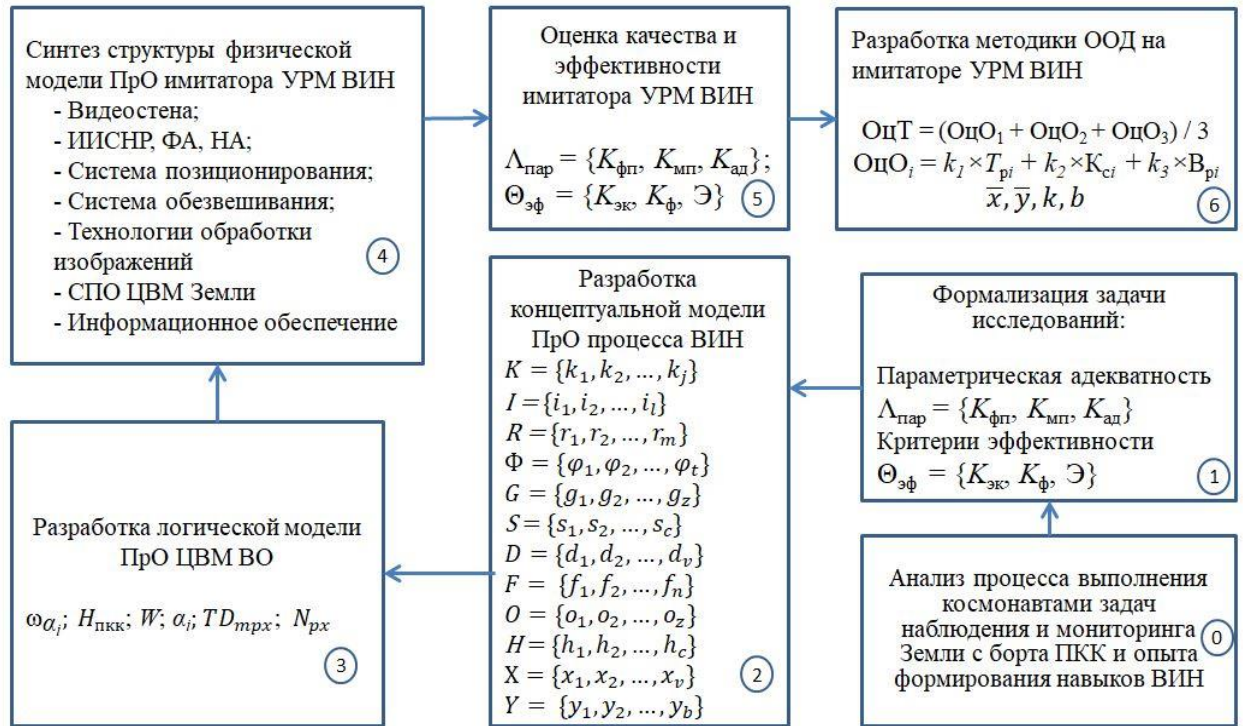


Рисунок 1.13 – Методическая схема решения научной задачи

Для получения количественных оценок проектируемого УРМ в системе формирования деятельности ВИН требуется введение показателей параметрической адекватности и критерии эффективности проектируемого имитатора УРМ ВИН.

Для количественной оценки уровня совершенства УРМ для подготовки к ВИН введем множество показателей параметрической адекватности $\Lambda_{\text{пар}}$ [59, 60, 61]:

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

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

Коэффициент функциональной полноты $K_{\text{фп}}$ определяется как отношение количества отрабатываемых на данном тренажере навыков N_{Hj} к общему числу навыков N_H , необходимых для выполнения операции ВИН

$$K_{\text{фп}} = \frac{N_{Hj}}{N_H} \quad (1.1)$$

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

$$K_{МП} = \frac{N_{Мj}}{N_M} \quad (1.2)$$

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

$$K_{АД} = \frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}} \quad (1.3)$$

Идеальное УРМ количественно характеризуется следующими значениями коэффициентов

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

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 качества имитатора УРМ [62]

$$K_{ИН} = \sigma_1 K_{МП} + \sigma_2 K_{ФП} + \sigma_3 K_{АД} \quad (1.4)$$

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

Эффективность разрабатываемого УРМ будет оцениваться на основании множества специальных критериев $\theta_{ЭФ}$ [77].

$$\theta_{ЭФ} = \{K_{ЭК}, K_{Ф}, Э\},$$

где $K_{ЭК}$ – критерий экономической эффективности, $K_{Ф}$ – критерий эффективности формирования деятельности ВИН на УРМ, $Э$ – составной критерий эффективности.

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

$$K_{\text{ЭК}} = \frac{F(P)}{Z}, \quad (1.5)$$

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_{Φ} формирования деятельности ВИН на универсальном рабочем месте рассчитывается по формуле

$$K_{\Phi} = P_{\Phi}(t)P_{\text{оп}}(t), \quad (1.6)$$

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

$$P_{\text{оп}}(t) = P_{\text{обн}}(t)P_{\text{уд}}(t)P_{\text{с}}(t)P_{\text{кс}}(t), \quad (1.7)$$

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

Составной критерий эффективности $\mathcal{E}$ рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = k_1\mathcal{E}_1 + k_2\mathcal{E}_2 + \dots + k_n\mathcal{E}_n \quad (1.8)$$

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); $\mathcal{E}_6$ – количество объектов детального наблюдения. Весовые коэффициенты $k_1, k_2, \dots, k_n$ определены экспертным (космонавты и специалисты) путем последовательных сравнений.

Идеальное УРМ согласно множества критериев $\theta_{\text{ЭФ}}$ характеризуется значением критерия эффективности $K_{\text{Ф}} = 1$, составного критерия $\text{Э} = 5$. Значение же экономической эффективности будет оптимальным при получении максимальной прибыли при минимальных затратах на производство и эксплуатацию УРМ ВИН.

Выводы по Главе 1

- 1 Проведен системный анализ процесса выполнения космонавтами программ ВИН на борту существовавших и современных ПКК.
- 2 Определены проблемные вопросы процесса ВИН на борту ПКК:
 - создается перспективная РОС, одной из основных целей которой будет исследование 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 уходит порядка 2–3 месяцев, что очень много, учитывая длительность их экспедиции 4–6 месяцев.
- 3 Разработаны предложения по разработке имитатора УРМ ВИН нового поколения для решения задач ВИН.
- 4 Выполнена теоретическая формализация решаемой в работе научной задачи: для проектирования УРМ ВИН используется метод трёхуровневого моделирования.
- 5 Приведена схема организации и проведения исследования.
- 6 Введены показатели параметрической адекватности и критерии эффективности. УРМ ВИН должно быть спроектировано с максимальными показателями качества и эффективности при существующих требованиях и ограничениях. Описано понятие идеального УРМ, для понимания к каким значения должны стремиться заданные показатели адекватности и критерии эффективности.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВИН С БОРТА ПКК

2.1 Рассмотрение элементов концептуальной модели предметной области процесса операторской деятельности космонавта и определение их взаимодействия при выполнении ВИН с борта ПКК

Процесс выполнения космонавтами ВИН на борту ПКК состоит из ряда процедур, имеющих свою специфику операторской деятельности, требующий выработки профессиональных навыков по их выполнению. В главе 1 работы проведен системный анализ процесса выполнения космонавтами задач наблюдения и мониторинга Земли с борта ПКК, что позволяет выделить все составляющие данного процесса и определить их взаимосвязь. Проектирование имитатора УРМ ВИН должно проводиться на основе концептуальной модели предметной области процесса операторской деятельности при выполнении космонавтами задач наблюдения и мониторинга Земли.

Концептуальная модель предметной области процесса операторской деятельности при выполнении ВИН Земли с борта ПКК (рисунок 2.1) представляет собой сложную систему взаимодействия следующих элементов: экипажа ПКК, бортовых систем ПКК, Центра управления полетом (ЦУП) и объектов наблюдения. В работе впервые определены и описаны аддитивные показатели каждого элемента процесса ВИН и факторов, влияющих на процесс ВИН.

Процесс операторской деятельности при выполнении ВИН включает несколько ключевых этапов (рисунок 2.2):

- планирования сеансов ВИН (изучение исходных данных);
- подготовка к выполнению сеансов ВИН (подготовка используемой аппаратуры и изучение объектов исследований);

- выполнение сеанса ВИН (поиск, обнаружение, распознавание и регистрация объекта + ведение репортажа);
- заключительный этап (обработка полученных изображений и сброс данных на Землю).

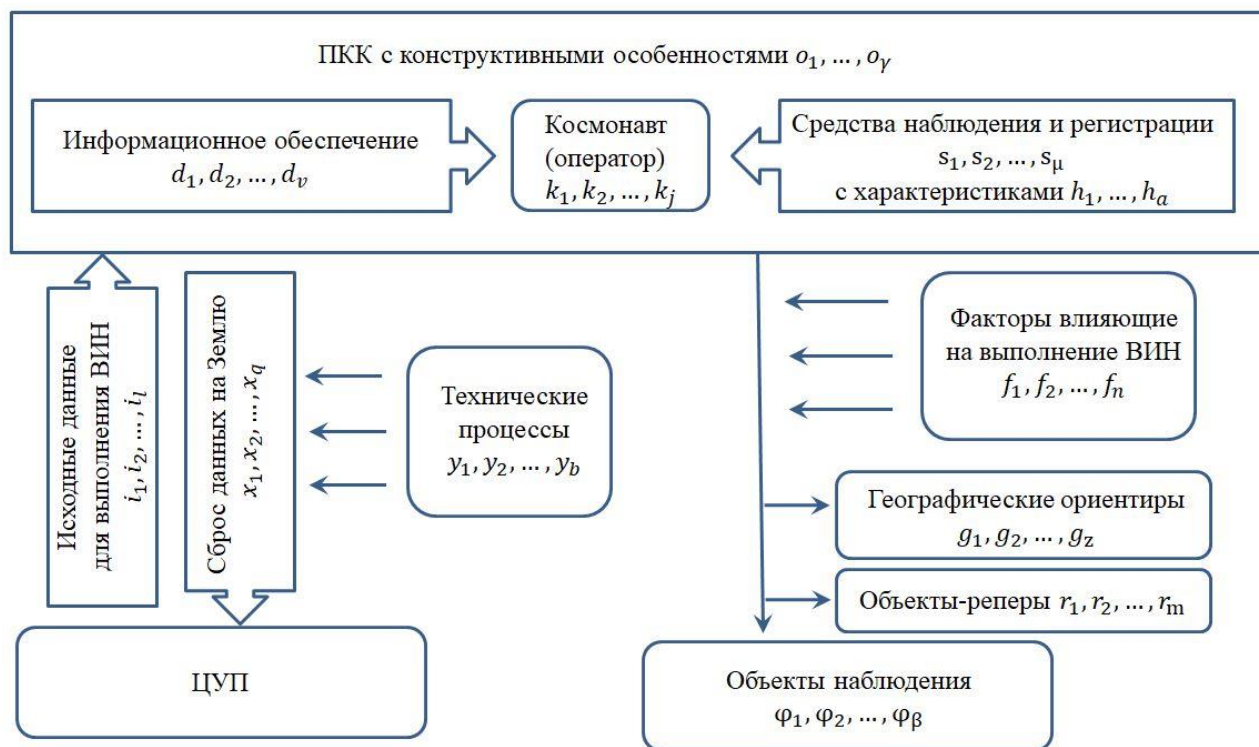


Рисунок 2.1 – Концептуальная модель предметной области процесса выполнения ВИН (графическое представление)



Рисунок 2.2 – Основные этапы ВИН

1 Планирование наблюдения

На этом этапе определяются цели и задачи наблюдения, выбираются районы Земли для исследования, а также составляется график работы оператора.

Оператор – это специалист, который занимается мониторингом, анализом и регистрацией различных объектов наблюдения с помощью специальных приборов и инструментов. На качество и эффективность выполнения экспериментов, связанных с ВИН влияют личные качества и психофизиологические особенности оператора $k_1, k_2, \dots, k_j$, где:

k_1 – степень физической нагрузки и усталость космонавта;

k_2 – психоэмоциональное состояние космонавта (усталость, стресс, недосып);

k_3 – оперативность мышления (определяется способностью быстро оценить ситуацию, спрогнозировать развитие событий и принимать решения в условиях дефицита времени);

k_4 – зрительная память (определяется способностью запоминать и сравнивать текущие образы объектов наблюдения);

k_5 – пространственное воображение (определяет способность оператора мысленно представлять и прогнозировать траекторию движения объектов в трехмерном пространстве, координировать свои действия, оценивать взаимное расположения объектов);

k_6 – развитый глазомер (определяется способностью оценивать расстояние, размер, форму, положение объектов в пространстве, а также прогнозировать их движение, без использования измерительных инструментов);

k_7 – скорость реакции (определяет возможностью оператора быстро действовать при изменении наблюдаемой обстановки);

k_8 – устойчивость в переключении внимания (характеризуется умением оператора плавно и быстро переключать внимание с объекта на объект);

k_9 – эффективное распределение внимания (позволяет оператору

справляться с большим количеством информации, расставлять приоритеты в задачах и реагировать на изменения в режиме реального времени);

k_{10} – пороги световой, контрастной и спектральной чувствительности (порог световой чувствительности глаза оператора определяет минимальный уровень света, необходимый для того, чтобы глаз мог воспринять объект, это важно, так как условия освещения в космосе могут быть крайне низкими; порог контрастной чувствительности определяет возможность различать разницу в яркости между двумя соседними низкоконтрастными объектами; спектральная чувствительность определяет способность различать различные цвета и оттенки в видимом диапазоне, охватывающем длины волн от приблизительно 380 до 750 нанометров);

k_{11} – острота зрения (определяет способность различать мелкие детали и объекты на расстоянии, при снижении остроты зрения оператор может пропустить важные элементы или неправильно оценить их размеры и форму, длительное пребывание в космосе может вызвать изменения в зрительной системе, такие как отек диска зрительного нерва и повышение внутричерепного давления);

k_{12} – скорость различения объектов (определяется способностью оператора быстро распознавать и идентифицировать объекты в движении);

k_{13} – оперативная зрительная работоспособность (определяется способностью глаза и нервной системы оператора поддерживать высокий уровень эффективности восприятия и обработки визуальной информации в течение продолжительного времени, так как условия наблюдения объектов из космоса могут требовать длительного непрерывного внимания и быстрого реагирования);

k_{14} – пропускная способность (определяет объем информации, который мозг может обработать за единицу времени);

k_{15} – профессиональные навыки, квалификация, опыт (оператор должен обладать глубокими знаниями, чтобы правильно настроить оборудование и выбрать оптимальные параметры съемки, он должен уметь работать с

различными типами камер, фильтров и программного обеспечения для обработки изображений, опытный оператор быстрее и точнее выполняет ВИН, понимание принципов работы оборудования помогает избежать ошибок и получить качественный результат);

k_{16} – стрессоустойчивость (работа в условиях ограниченного времени и высокой ответственности требует способности сохранять спокойствие и принимать решения в стрессовых ситуациях, оператор должен уметь справляться с неожиданными проблемами и находить быстрые решения);

k_{17} – творческий подход (хотя съемка из космоса является технической задачей, творческий подход тоже важен, умение видеть необычные ракурсы, подбирать интересные композиции и экспериментировать с освещением поможет создать уникальные и запоминающиеся изображения);

k_{18} – аналитические способности (аналитический ум помогает оператору оценить текущие условия и спрогнозировать возможные изменения).

Задание на выполнение наблюдения оператор получает из ЦУПа в виде радиогаммы, в которой прописаны исходные данные $i_1, i_2, \dots, i_l$ для выполнения ВИН:

i_1 – наименование эксперимента;

i_2 – дата выполнения съемки;

i_3 – цель и задача съемки;

i_4 – наименование средства регистрации объекта наблюдения;

i_5 – иллюминатор для съемки;

i_6 – перечень объектов с характеристиками $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_\beta$ на Земле, которые необходимо наблюдать;

i_7 – расчетное время видимости объекта (объектов) наблюдения;

i_8 – указания по передаче фотоизображений в ЦУП;

i_9 – изображения участков цифровой карты в разных форматах района расположения объекта, ориентированных по ходу движения станции с указанием объектов–реперов $r_1, r_2, \dots, r_m$.

С борта ПКК оператор наблюдает множество объектов с характеристиками $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_\beta$, где:

φ_1 – размер объекта (маленькие объекты: труднее обнаружить и распознать, требуют высокочувствительных датчиков и камер с высоким разрешением; большие объекты: легче обнаруживаются, но могут потребовать нескольких кадров для полного охвата (например, континенты или крупные горные цепи));

φ_2 – нахождение относительно трассы полета (близость объекта к трассе полета ПКК позволяет получить снимки с минимальным перспективным искажением, при смещении объекта от надирной линии угол наклона увеличивается, что приводит к увеличению перспективных искажений и изменению масштаба объекта на снимке, чем дальше объект от трассы полета, тем хуже разрешение получаемого изображения и меньше времени на выполнение фотосъемки);

φ_3 – контрастность (высокая контрастность объектов: хорошо выделяются на фоне окружения, что облегчает их идентификацию, низкая контрастность объектов: трудно отличить объект от фона, требуется использование специализированных фильтров и алгоритмов обработки изображений);

φ_4 – форма объекта (простые геометрические формы: легко распознаются и описываются математически, сложные формы: требуют более тщательного анализа и обработки данных).

Исходя из этого сформулируем параметры, которыми обладает объект наблюдения, и представим их в таблице 2.1.

Большая часть времени сеанса наблюдения затрачивается на поиск и обнаружение заданных объектов сначала в поле зрения иллюминатора ПКК, а затем и в поле зрения средства наблюдения $s_1, s_2, \dots, s_\mu$. Для облегчения выполнения задачи обнаружения у оператора должны быть сформированы географические ориентиры $g_1, g_2, \dots, g_z$ по трассам полета ПКК.

Таблица 2.1 – Параметры объектов наблюдения при выполнении ВИН

№ п/п	Типы объектов	
1	По форме	Площадные объекты
		Точечные объекты
2	По размеру	Крупные объекты (более 15 км)
		Средние объекты (8-15 км)
		Мелкие объекты (менее 8 км)
3	По контрасту	Высококонтрастные объекты
		Среднеконтрастные объекты
		Малоконтрастные объекты

Географический ориентиры – это объекты поверхности Земли с априори известными географическими координатами, имеющие размер не менее 1х1 км, характерные расположение и очертания, выделяющие их из множества объектов данного класса и обеспечивающие их обнаружение и распознавание профессионально подготовленным оператором с вероятностью, близкой к единице, в условиях наблюдения невооруженным глазом через иллюминатор в высоты полета ПКК при идеальных условиях наблюдения (отсутствие дымки, облачности, угол Солнца над горизонтом не менее 15 градусов).

В радиограмме на изображении участков цифровой карты района расположения заданного объекта наблюдения указаны объекты-реперы $r_1, r_2, \dots, r_m$. Объект-репер – это объект поверхности Земли с априори известными значениями азимута и расстояния до заданного объекта наблюдения в пределах поля зрения средства наблюдения, имеющий размер не менее 0,3х0,3 км и наибольший контраст относительно фона, обеспечивающие его обнаружение и распознавание с вероятностью близкой к единице профессионально подготовленным оператором ПКК в условиях наблюдения с помощью оптического средства через иллюминатор в высоты полета при идеальных условиях наблюдения.

2 Подготовка к выполнению ВИН

На этом этапе оператор подготавливает необходимые инструменты и оборудование для проведения наблюдений $s_1, s_2, \dots, s_\mu$,

s_1 – фотоаппарат (с телеобъективом);

s_2 – спектрорадиометр (измеряет отражательную способность земной поверхности в различных диапазонах электромагнитного спектра);

s_3 – лидарная система (используя лазерные импульсы, определяет высоту облаков, толщину ледников и другие параметры земной поверхности);

s_4 – научная аппаратура.

Каждый инструмент, используемый оператором как средство регистрации, обладает набором индивидуальных характеристик $\{h_1, \dots, h_a\}$, значение которых также влияет на качество выполнения ВИН:

h_1 – чувствительность прибора (чем выше чувствительность прибора, тем более мелкие детали можно обнаружить);

h_2 – разрешение (высокое разрешение позволяет различать мельчайшие объекты);

h_3 – уровень заряда батареи;

h_4 – работоспособность;

h_5 – техническое состояние средств регистрации.

К этапу подготовки, также относится проведение предварительного сбора информации об объектах наблюдения. Состав информационного обеспечения выполнения операций ВИН $d_1, d_2, \dots, d_\nu$:

d_1 – радиограмма;

d_2 – бортовая документация;

d_3 – полётное задание;

d_4 – навигационно-баллистическая система;

d_5 – географический атлас.

По радиограмме оператор изучает краткие сведения об объекте (объектах) наблюдения, выбирает для себя географические ориентиры и объекты-реперы.

Для более глубокого изучения объекта наблюдения оператор может воспользоваться электронным полётным заданием, которое разрабатывают постановщики эксперимента для каждой экспедиции, с учетом текущих задач мониторинга и сезонности. В полетном задании сформулированы основные цели эксперимента, перечень планируемых объектов наблюдения, описание задач по каждому объекту, космические фотоснимки с поясняющими подписями.

Бортовая документация [46] – это вид специальной документации, которую космонавты используют в полете на ПКК. В этом документе прописаны алгоритмы действий экипажа по работе со служебными системами, научными экспериментами, транспортным кораблем, техническому обслуживанию оборудования станции, внекорабельной деятельностью.

Для обеспечения навигационной и баллистической информацией, космонавты используют специальное программное обеспечение, которое позволяет спрогнозировать и оперативно рассчитать условия визуальных наблюдений, рассчитать ориентацию иллюминаторов, смоделировать орбитальное движение станции. Положение станции, трасса полёта, подспутниковая точка, зоны видимости объекта наблюдения, время начала и окончания сеанса связи, светотеневая обстановка на орбите – постоянно отображаются на экране в реальном времени.

3 Выполнение ВИН

Этот этап является основным и включает непосредственное выполнение визуального и инструментального мониторинга. Оператор выполняет операции: поиска и обнаружения района расположения заданного объекта невооруженным глазом при наблюдении в иллюминатор, поиска объекта при наблюдении через объектив фотокамеры, обнаружение и захват объекта на сопровождение, прецизионное наведение центра кадра на объект и регистрация объекта.

ВИН из космоса зависит от множества факторов, которые включают в себя множество внешних факторов $f_1, f_2, \dots, f_n$ и конструктивные особенности

ПКК $\{o_1, \dots, o_y\}$, которые могут влиять как на качество получаемых данных, так и на саму возможность проведения наблюдений. Внешние факторы:

f_1 – высота орбиты (низкая орбита обеспечивает более высокое разрешение изображений, но охватывает меньшую площадь за одно наблюдение);

f_2 – наклонение орбиты (определяет широты наблюдаемой области);

f_3 – тип орбиты (влияет на частоту прохождения над одной и той же точкой земной поверхности);

f_4 – атмосферные условия: облачность, дымка, пыль, туман (облачность блокирует видимость земной поверхности для оптических датчиков, пыль, дымка, туман снижают прозрачность атмосферы);

f_5 – освещенность (играет ключевую роль в получении качественных изображений, чем ярче освещение, тем больше деталей можно увидеть на снимке, однако слишком яркий солнечный свет может привести к переэкспонированию изображения, когда светлые участки становятся полностью белыми, теряя детали);

f_6 – тени (создают контраст на изображении, выделяя объекты и подчеркивая их форму, однако чрезмерные тени могут скрывать важные детали, делая некоторые участки изображения неразличимыми, особенно это актуально при съемке горных районов, где глубокие тени могут закрывать значительную часть рельефа);

f_7 – угол падения солнечных лучей (влияет на длину теней и степень освещения, при низком положении Солнца над горизонтом тени будут длинными, создавая сильный контраст между освещенными и затененными участками, это может затруднить интерпретацию изображения, так как многие детали окажутся скрытыми в тени);

f_8 – время суток (меняется положение Солнца и, соответственно, светотеневое распределение на поверхности Земли, утренние и вечерние часы характеризуются длинными тенями и мягким светом, что создает интересные эффекты, но может усложнять задачу выделения мелких деталей, днем Солнце

находится высоко, обеспечивая равномерное освещение, при этом увеличивая риск появления бликов и отражений, ночные съемки требуют использования специальных инструментов, таких как тепловизионные камеры);

f_9 – сезон года (смена сезонов приводит к изменению угла падения солнечных лучей и продолжительности дня, зимой, например, угол падения солнечных лучей меньше, что увеличивает длину теней, лето характеризуется более длительным периодом дневного света и меньшими тенями, изменяется стратегия ориентирования на местности);

f_{10} – дефицит времени, время пролета ПКК над объектом (средняя скорость ПКК на низкой околоземной орбите составляет примерно 7,8 км/с и может варьироваться в зависимости от высоты, время пролета над объектом составляет порядка 1 минуты, то есть операция ВИН выполняется в условиях жесткого дефицита времени. За это время оператор должен найти невооруженным глазом ориентиры в информационном поле на земной поверхности, соответствующей площади порядка 1 млн. кв. км, навестись оптическим средством регистрации в область нахождения объекта, и выполнить съемку);

f_{11} – наличие спецэффектов (пожаров, пылевых бурь, извержения вулканов).

К конструктивным особенностям станции относятся:

o_1 – расположение и количество иллюминаторов (определяет возможности для съемки: большее количество иллюминаторов позволяет охватить больший диапазон направлений и углов обзора, что особенно важно при съемке динамичных процессов, расположение иллюминаторов должно обеспечивать удобный доступ для операторов и возможность установки необходимого оборудования);

o_2 – размер и форма иллюминаторов (влияют на количество света, попадающего внутрь комплекса, и на угол обзора: большие иллюминаторы обеспечивают лучший обзор и позволяют использовать более мощные камеры и телескопы, форма иллюминаторов должна быть такой, чтобы

минимизировать искажения и абберации, возникающие при прохождении света через стекло);

O_3 – повреждения иллюминаторов (иллюминаторы подвергаются воздействию микрометеоритов и космического мусора, которые могут оставлять царапины и трещины на стекле, даже небольшие повреждения могут вызывать рассеивание света и ухудшение четкости изображения);

O_4 – отражения и блики иллюминаторов (иллюминирующие элементы внутри космического аппарата могут создавать отражения и блики на стеклах иллюминатора, что мешает качественной съемке, чтобы минимизировать этот эффект, используются антибликовые покрытия и специальные фильтры, а также выбираются оптимальные углы съемки);

O_5 – чистота иллюминаторов (обеспечивает максимальную прозрачность, избегание искажений изображения, загрязнение стекла пылью, конденсатом или другими веществами может значительно ухудшить качество снимков);

O_6 – наличие пристыкованных модулей (пристыкованные модули могут значительно ограничивать зону видимости наблюдаемой поверхности);

O_7 – наличие манипуляторов и роботов (роботизированные манипуляторы могут использоваться для перемещения камер и другого оборудования вне корабля, это позволяет выполнять съемку в труднодоступных местах и изменять направление съемки без необходимости выхода космонавтов в открытый космос);

O_8 – наличие системы стабилизации (необходима для поддержания стабильного положения при съемке, что особенно важно при использовании длиннофокусной оптики, где малейшие вибрации могут привести к смазу изображения);

O_9 – наличие системы энергосбережения (камеры и другое оборудование для съемки потребляют значительное количество энергии, поэтому наличие надежной системы энергоснабжения является критическим фактором, кроме того, высокие температуры, возникающие в результате работы электроники,

требуют эффективной системы охлаждения, чтобы предотвратить перегрев оборудования и ухудшение качества снимков);

o_{10} – наличие места для хранения данных (определяют возможности для хранения и предварительной обработки данных, оборудование ПКК мощными компьютерами с большими объемами памяти позволяет обрабатывать изображения прямо на борту и отправлять готовые данные на Землю).

4 Заключительный этап

После завершения наблюдений проводится анализ полученных данных, обработка изображений с использованием специализированного программного обеспечения и передача информации $x_1, x_2, \dots, x_q$ на Землю в ЦУП, для дальнейшего использования и анализа. На связь с ЦУП влияет ряд технических процессов $\{y_1, \dots, y_b\}$:

y_1 – скорость обмена информацией;

y_2 – автоматизация процесса обработки и архивирования данных;

y_3 – оперативность реагирования на запросы экипажа и сбои в работе техники;

y_4 – качество и надежность канала связи между бортовыми системами и наземным центром управления полетом;

y_5 – качество передаваемых команд и рекомендаций экипажу;

y_6 – способность обеспечить точность настройки оборудования и обработку полученной информации;

y_7 – работоспособность оборудования;

y_8 – наличие связи с ЦУП, проблемы с передачей данных;

y_9 – невнимательность космонавта или специалиста ЦУП;

y_{10} – отказ вспомогательных систем (ноутбук, планшет).

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 2.2.

Таблица 2.2 – 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

Таблица 2.2 (продолжение)

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 ПКС (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 $K(t)$ – набор 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, $S(t)$ – средство наблюдения и регистрации используемое (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:

$$\Sigma(IS) = \{\Sigma_{EB}, \Sigma_{BQ}, \Sigma_{QE}, \Sigma_{IS \rightarrow A}\}$$

где $\Sigma_{EB}(\mathcal{E}, B)$ – 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.

2.2 Расчет рабочих зон выполнения ВИН с порта ПКК

Рабочие зоны при выполнении ВИН (рисунки 2.3, 2.4) определяются высотой орбиты ПКК – $H_{\text{ПКК}}$ и углом обзора от направления в надир α_i (равен половине угла обзора через иллюминатор). Для получения качественных фотоснимков, съемка выполняется в зоне ограниченной углом обзора 30° (от направления в надир). Зона ориентирования и обнаружения ограничена углом $45\text{--}60^\circ$ (от направления в надир) [21].

При больших углах обзора отраженное поверхностью Земли излучение играет роль помехи, которая воздействует на боковое зрение космонавта и существенно препятствует обнаружению объектов. Боковое зрение человека по сравнению с центральным зрением имеет существенно меньшее разрешение и более чувствительно к перемещению объектов.

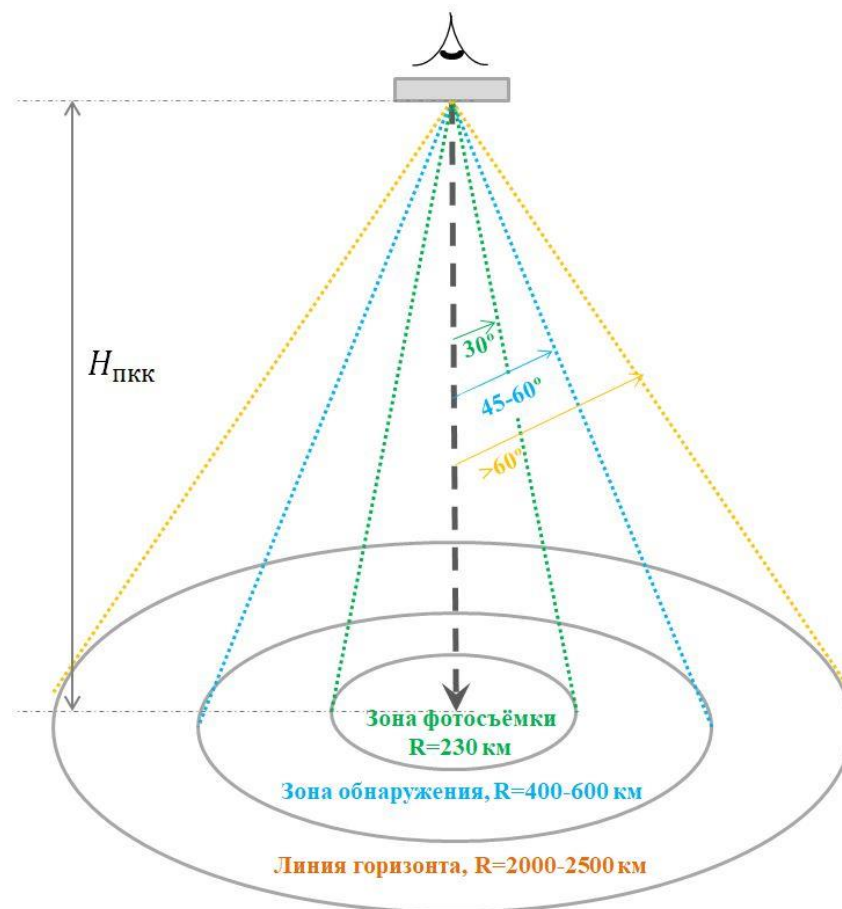


Рисунок 2.3 – Рабочие зоны при выполнении ВИН

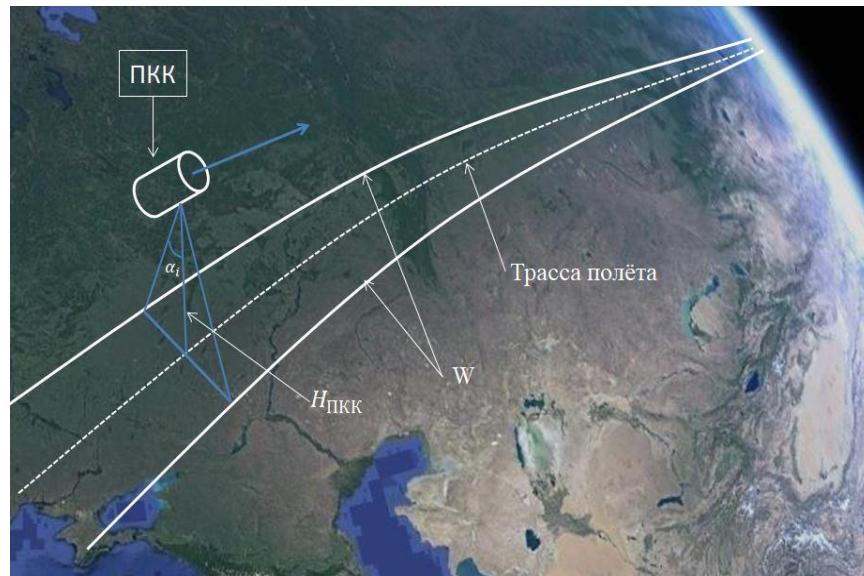


Рисунок 2.4 – Полоса обзора поверхности Земли с борта ПКК

Рассчитаем ширину полосы обзора W наблюдаемой поверхности с высоты орбиты $H_{\text{ПКК}}$ при угле обзора $2\alpha_i$, с учетом кривизны наблюдаемой поверхности (сферичность Земли, Луны), используя формулу (рисунок 2.5):

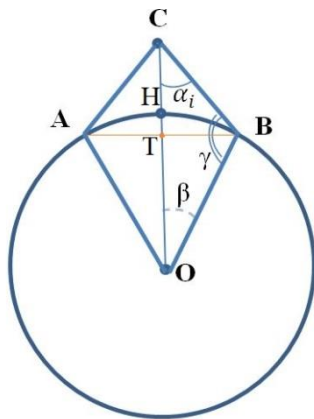


Рисунок 2.5 – опорный рисунок для вычисления ширины полосы обзора

$$W = |\widehat{AB}| = \frac{\pi \cdot R \cdot 2\beta}{180^\circ}$$

где R – радиус наблюдаемой поверхности (Земли/Луны),

$$R = OA = OB = OH, CH = H_{\text{ПКК}}$$

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

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

Площадь сегмента S наблюдаемой поверхности вычисляется по формуле:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot HT, \text{ где } HT = \sqrt{R^2 - TB^2}.$$

Результаты вычислений ширины полосы наблюдаемой поверхности и площади сегмента наблюдаемой поверхности для углов обзора от направления в надир $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ и $\pm 60^\circ$ современных и перспективных ПКК представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Расчеты для рабочих зон имеющихся и перспективных ПКК

	α_i	30°		45°		60°	
ПКК:	$H_{\text{ПКК}}$, 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

Выводы по Главе 2

1 Впервые разработана концептуальная модель 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.

2 Сформулированы основные ключевые этапы выполнения ВИН с борта ПКК, включающие в себя: планирование ВИН, подготовку к ВИН, выполнение ВИН и оперативную обработку полученных изображений и сброс данных на Землю.

3 Впервые определены и представлены в работе аддитивные показатели каждого элемента и факторов, влияющих на процесс ВИН.

4 Рассчитана ширина полосы обзора наблюдаемой поверхности с высоты орбиты ПКК при различных углах обзора, с учетом кривизны наблюдаемой поверхности для создаваемого УРМ и перспективных УРМ (РОС, лунный комплекс).

5 Рассчитана площадь сегмента наблюдаемой поверхности с высоты орбиты ПКК при различных углах обзора, с учетом кривизны наблюдаемой поверхности для создаваемого УРМ и перспективных УРМ (РОС, лунный комплекс).

6 Выявлено, что для получения качественных фотоснимков съемка должна выполняться в зоне ограниченной углом обзора $\pm 30^\circ$ (от направления в надир).

ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ИМИТАТОРА УНИВЕРСАЛЬНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С БОРТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

3.1 Разработка цифровой модели визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта ПКК

Базовым элементом создания компьютерного имитатора универсального рабочего места космонавта для решения задач ВИН является создание цифровой модели визуальной обстановки наблюдаемой поверхности. Создаваемая цифровая модель визуальной обстановки представляет собой логическую модель предметной области решения задач визуально-инструментальных наблюдений с борта ПКК.

Компьютерные тренажеры, имитирующие внешнюю визуальную обстановку за счет программной генерации изображений, обладают большой гибкостью в перенастройке, но имеют существенные ограничения по адекватному воспроизведению полей зрения, разрешения на местности и яркости подстилающей поверхности. В настоящее время, значительное улучшение технических возможностей вычислительных средств, надежность их функционирования и существенное наполнение рынка информацией ДЗЗ, позволяет преодолеть эти ограничения.

Наиболее достоверно передаются визуальные свойства земной поверхности космическими фотоснимками, получаемыми цветными цифровыми фотокамерами с борта ПКК. Но получить всю трассу полета ПКК этими средствами не представляется возможным. Целесообразно для создания визуальной модели Земли применить результаты съемки с беспилотных систем мониторинга, что является первым требованием, предъявленным к имитатору УРМ ВИН.

Рассчитаем линейное разрешение зрительной системы человека ω_{α_i} на местности при наблюдении подстилающей поверхности с высоты полета ПКК в надир и на границах рабочих зон ВИН (рисунок 2.3). Данные вычисления позволят определить, каким разрешением должно обладать средство визуализации имитатора УРМ ВИН. Для вычисления используем формулы:

$$\omega_{1^\circ} = \frac{\operatorname{tg} 1^\circ \cdot H_{\text{ПКК}}}{60} \quad (3.1)$$

$$\omega_{\alpha_i} = \frac{\sin 1^\circ \cdot \sqrt{H_{\text{ПКК}}^2 + (0,5 \cdot W(\alpha_i))^2}}{\cos(\alpha_i - 1^\circ) \cdot 60} \quad (3.2)$$

с учетом того, что разрешающая способность зрительной системы человека при нормальном зрении и оптимальных условиях освещенности в среднем равна $1'$.

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) [21]. При отклонении линии визирования от надира на углы $\alpha_i = 30^\circ, 45^\circ\text{--}60^\circ$ (в соответствии с рабочими зонами на рисунке 2.3) ухудшает линейное разрешение глаза на местности, которое (по законам геометрической оптики) будет равно соответственно 154 и 233–494 м [21]. 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.

Требования к цифровой модели визуальной обстановки имитатора УРМ ВИН [4]

1 ЦВМ Земли должна быть основана на базе космофотоснимков, разрешением от 117 м/пиксел (для адекватного наблюдения объектов с высоты орбиты ПКК) до 15 м/пиксел (для возможности детального наблюдения).

2 При формировании изображения Земли должна имитироваться ее сферичность.

3 Имитируемая высота орбиты должна регулироваться в диапазоне от 300 до 400 км, должна имитироваться атмосфера, освещение Земли Солнцем, линия терминатора, линия горизонта.

4 Должна имитироваться динамичность ПКК относительно наблюдаемой поверхности в соответствии с орбитальной скоростью.

5 При формировании изображения водных поверхностей должен имитироваться блик от Солнца.

6 Должны имитироваться Солнце, Луна, навигационные звезды в соответствии с текущим положением станции на орбите.

7 Должны индицироваться перекрестие точки визирования и границы изображения видимого через штатные инструментальные средства визуального наблюдения.

8 Должна быть обеспечена возможность моделирования различных метеоусловий в районе наблюдений с помощью имитации облачного слоя, дымки над поверхностью Земли.

9 Должна быть обеспечена возможность имитации замедленного (в 2 и в 4 раза) и ускоренного (в 4–10 раз) движения ПКК по орбите. При имитации ускоренного движения допускается снижение видимого разрешения текстуры Земной поверхности.

10 Должна быть обеспечена возможность имитации плавного изменения положения (положение камеры) и ориентации (направления визирования) инструментальных средств наблюдения относительно иллюминаторов станции в согласованных пределах углов и расстояний, а также возможность имитации

плавной трансфокации с соответствующим изменением угла зрения от 90° и до 2° . При попадании в поле зрения объектов детального наблюдения видимое разрешение изображения должно изменяться от минимального (117 м/пиксел) до максимального (15 м/пиксел). Для обеспечения более детальных наблюдений при имитации наблюдения через видоискатель прибора, должна быть обеспечена возможность наложения изображений участков поверхности с разрешением 2–4 м/пиксел на основную модель внешней визуальной обстановки УРМ.

11 Изображения внешних и внутренних элементов станции, попавших в поле зрения, должны соответствовать имитируемому положению, ориентации и уровню трансфокации инструментального средства наблюдения.

12 Должна быть обеспечена возможность регистрации деятельности оператора и запись параметров положения, ориентации и трансфокации, параметров движения станции и др. параметров в файл, а также возможность их последующего воспроизведения.

13 Ширина наблюдаемой полосы поверхности должна соответствовать расчётам, полученным в таблице 2.3.

На основании представленных требований создано специальное программное обеспечение цифровой модели визуальной обстановки – «СПО ЦВМ Земли», предназначенное для визуальной имитации участков Земной поверхности, описание которого приложено к работе в Приложении А.

Структура разрабатываемого СПО ЦВМ Земли представлена на рисунке 3.1.

В «СПО ЦВМ Земли» применяется классический способ визуализации земной поверхности – визуализация по принципу мозаики на основе бесшовных карт, который заключается в том, что вся земная поверхность разбивается на клетки вдоль параллелей и меридианов (рисунок 3.2). Каждой клетке соответствует текстура небольшого размера, называемая тайлом. Размер тайла составляет 256×256 текселов [4].



Рисунок 3.1 – Структура цифровой модели визуальной обстановки
«СПО ЦВМ Земли»

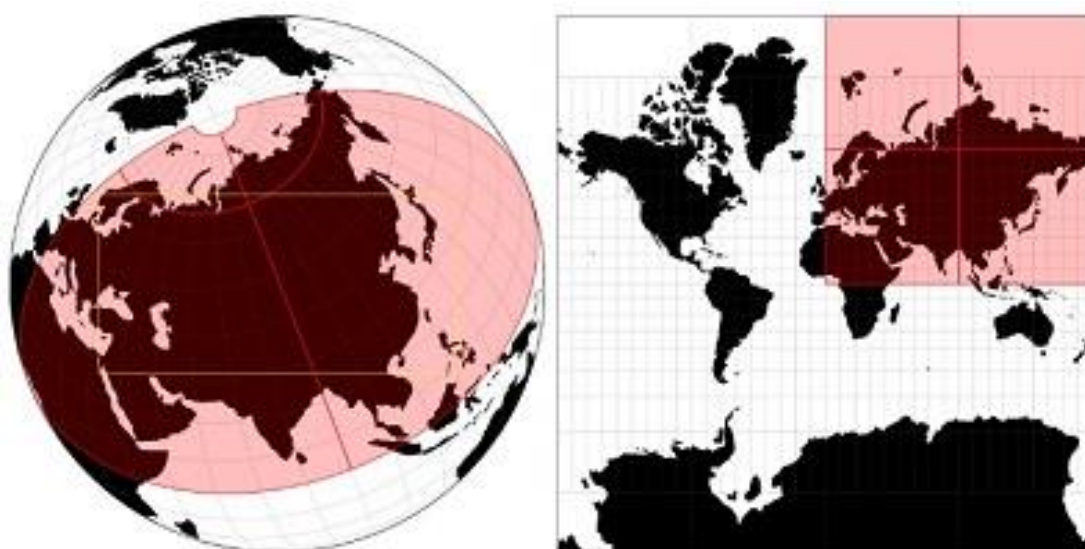


Рисунок 3.2 – Визуализация «СПО ЦВМ Земли» путем деления
бесшовной карты на квадраты небольшого размера – тайлов

Изображение земной поверхности в модели представлено в виде нескольких уровней детальности. Для уровня детальности №0 один тайл, т.е. текстура размером 256x256, покрывает всю земную поверхность. Для уровня детальности №1 используется уже 4 тайла – разрешение цельной текстуры увеличивается в два раза по каждой оси. Для уровня детальности №3 используется 16 тайлов и т.д. Таким образом, на каждом уровне детальности изображение цельной текстуры увеличивается в четыре раза по площади (либо в два раза по каждой оси) (рисунок 3.3, таблица 3.1) [4].

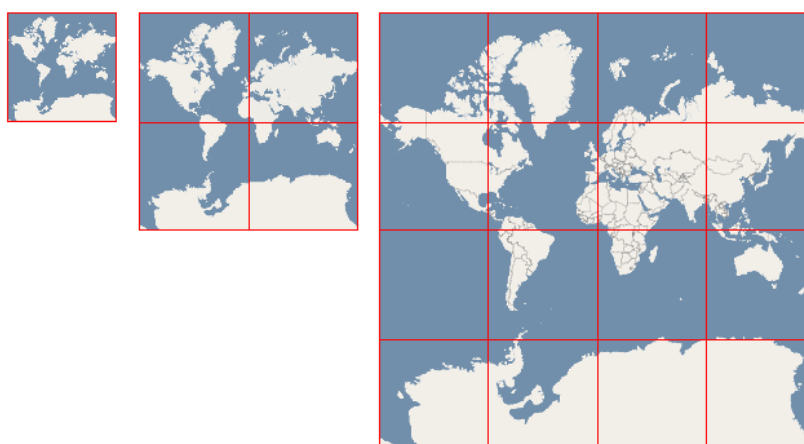


Рисунок 3.3 – Уровни детальности в «СПО ЦВМ Земли» (слева-направо): №0, №1, №2

Таблица 3.1 – Характеристики уровней детальности в «СПО ЦВМ Земли»

Номер уровня	Разрешение по горизонтали	Разрешение по вертикали	Кол-во тайлов по горизонтали	Кол-во тайлов по вертикали	Общее кол-во тайлов	Разрешение метров/тексел на экваторе
0	256	256	1	1	1	156 543,03
1	512	512	2	2	4	78 271,52
2	1 024	1 024	4	4	16	39 135,76
3	2 048	2 048	8	8	64	19 567,88
4	4 096	4 096	16	16	256	9 783,94
5	8 192	8 192	32	32	1 024	4 891,97
6	16 384	16 384	64	64	4 096	2 445,98
7	32 768	32 768	128	128	16 384	1 222,99
8	65 536	65 536	256	256	65 536	611,50
9	131 072	131 072	512	512	262 144	305,75
10	262 144	262 144	1024	1024	1 048 576	152,87

Таблица 3.1 (продолжение)

11	524 288	524 288	2048	2048	4 194 304	76,44
12	1 048 576	1 048 576	4096	4096	16 777 216	38,22
13	2 097 152	2 097 152	8192	8192	67 108 864	19,11
14	4 194 304	4 194 304	16384	16384	268 435 456	9,55
15	8 388 608	8 388 608	32768	32768	1 073 741 824	4,78

Один и тот же участок земной поверхности представлен на разных уровнях детальности, что позволяет выбирать в зависимости от условий наблюдения один из нескольких уровней детальности исходя из угла обзора наблюдения, разрешения экрана, аспекта экрана (отношение ширины экрана к высоте). На каждом уровне детальности определяется порядок нумерации тайлов, в зависимости от их положения по горизонтали и вертикали (рисунок 3.4).

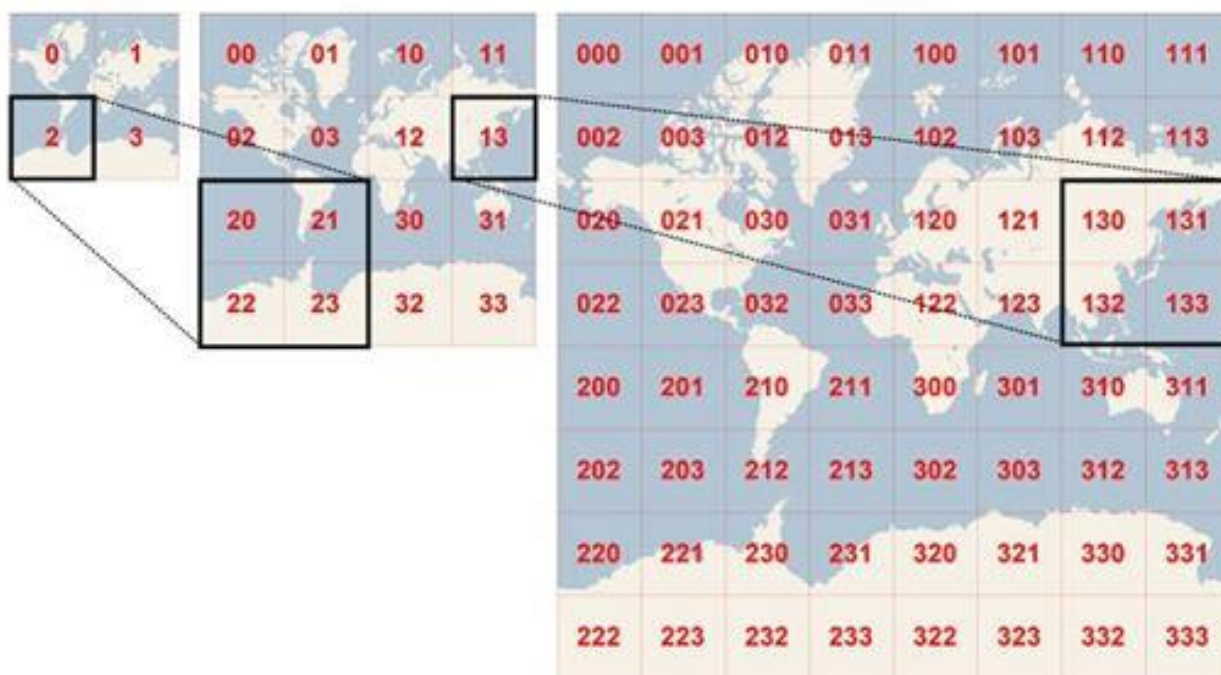


Рисунок 3.4 – Нумерация тайлов на разных уровнях

Для повышения производительности за счет оптимизации расположения тайлов был применен подход, основанный на кривых, заполняющих пространство. Принцип их действия заключается в минимизации расстояния

вдоль кривой между узлами, близкими в физическом пространстве (на плоскости). Кривая обеспечивает соответствие координат каждого квадрата его позиции (смещению) в дисковом файле. В «СПО ЦВМ Земли» реализована кривая Гильберта. Стоит отметить, что классическая кривая Гильберта предполагает использование квадрата со стороной, кратной степени двойки [4] (рисунок 3.5).

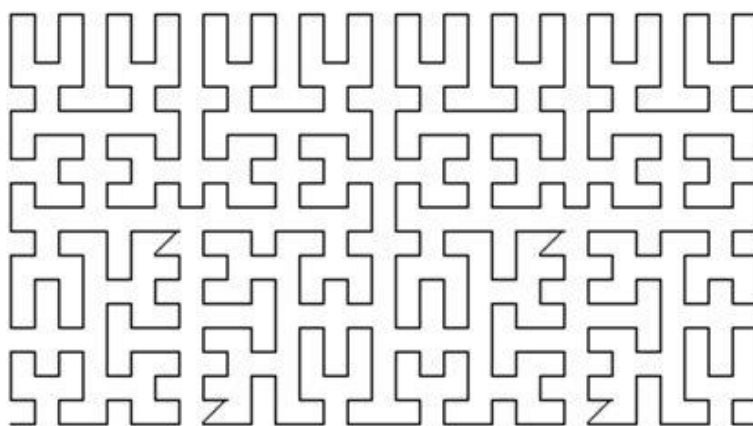


Рисунок 3.5 – Используемый в модели вариант кривой Гильберта для прямоугольной области

Применение метода, основанного на кривой Гильберта, затруднено особенностями картографической проекции Меркатора (рисунок 3.6). Данная проекция вызывает существенное варьирование разрешения текстуры (в метр/тексел) в зависимости от географической широты. Файлы текстур, используемые в модели и обладающие близким пространственным разрешением, организованы полосами, соответствующими разным уровням детализации. Для обеспечения максимальной детализации кривая Гильберта в модели первоначально строится для всей площади текстуры. Затем, в зонах с пониженным разрешением текстуры, выполняется прореживание узлов кривой. Описанный подход позволяет получить кривую Гильберта, изображенную на рисунке 3.7 [4].

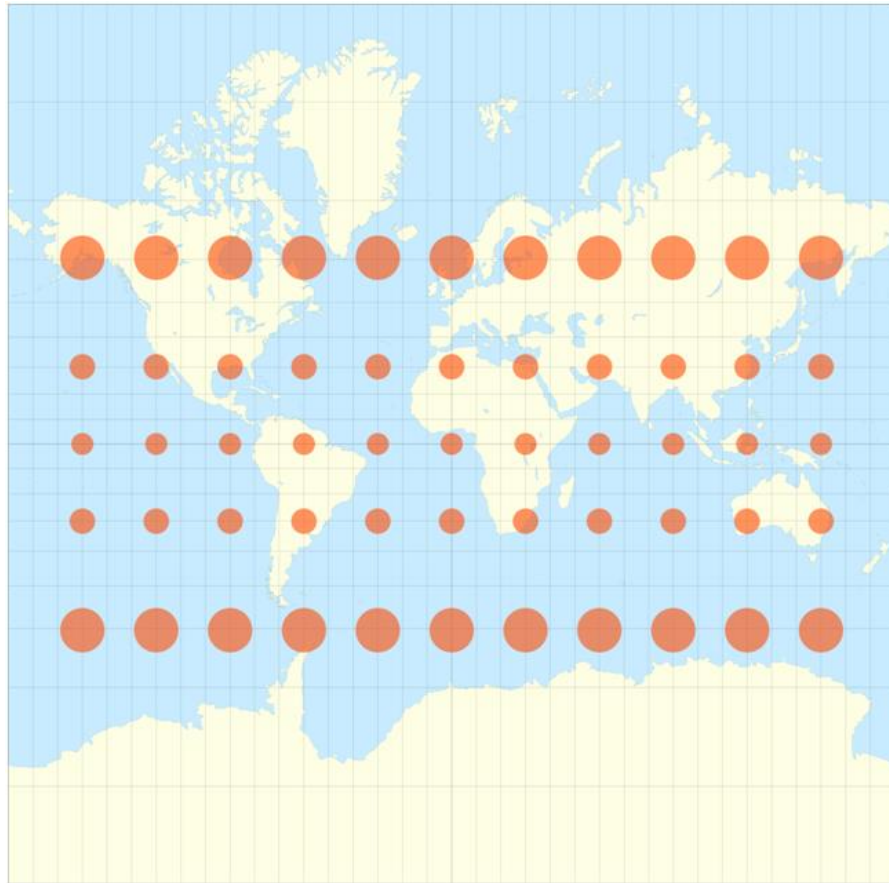


Рисунок 3.6 – Искажения площадей в проекции Меркатора на примере видимого диапазона пролета МКС

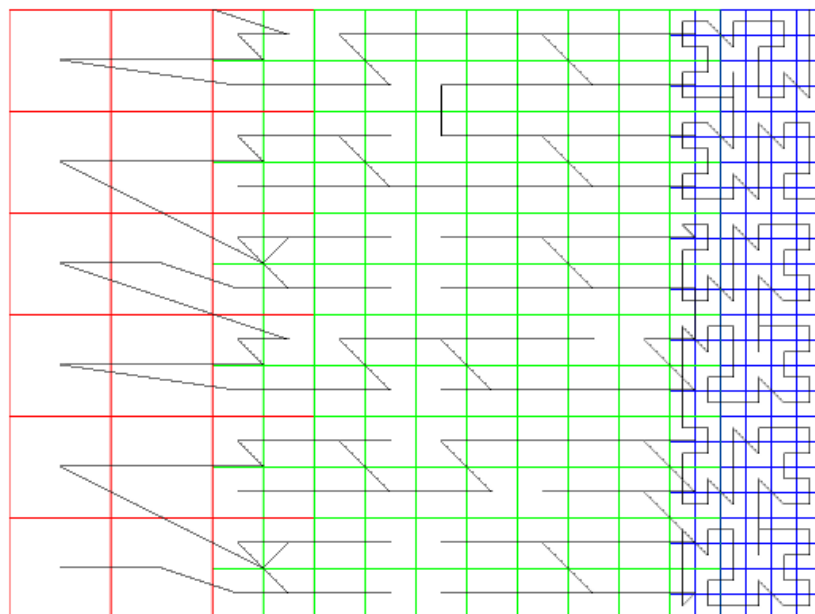


Рисунок 3.7 – Фрагмент варианта кривой Гильберта для текстурной информации Земли

На рисунке 3.7 синим, зеленым и красным показаны квадраты от разных уровней детальности, собранные в одном файле.

Для генерации изображения на экране оператора задействована подсистема упреждающей подкачки данных. В её задачи входит поддержание двух актуальных кэшей текстурной информации, формируемых согласно текущим параметрам визирования (направлению взгляда) и углу обзора виртуальной камеры: кэша jpeg и кэша dtx. Кэш jpeg составляют квадратные текстуры размером 256×256 текселей, чья структура хранения описана ранее. Кэш dtx, занимающий меньший объем, содержит преобразованное (из jpeg в dtx) подмножество текстур из jpeg-кэша. Необходимость двух кэшей обусловлена тем, что формат dtx, используемый графическими ускорителями для рендеринга, требует значительно больше памяти. Важно отметить, что оба кэша хранят текстуры для всех 13 уровней детализации проекции Меркатора, при этом требуемый уровень выбирается динамически в зависимости от текущего масштаба (угла обзора) виртуальной камеры [4].

Если средством наблюдения оператора является экран монитора, то в имитируемое средство инструментального наблюдения (фотокамеру) монтируется отражатель трекера положений. Излучатель и приемник трекера размещается над экраном. При движении оператора относительно экрана и изменении положения и ориентации фотокамеры в руках оператора будет соответствующим образом изменяться и изображение на экране. Например, если оператор сдвинется влево, то изображение обстановки за пределами иллюминатора тоже сдвинется влево, а справа в поле зрения попадут объекты, ранее закрытые иллюминатором (сам иллюминатор останется на месте) (рисунок 3.8). В обоих случаях изображение иллюминатора на экране не изменило своих размеров и размещения.

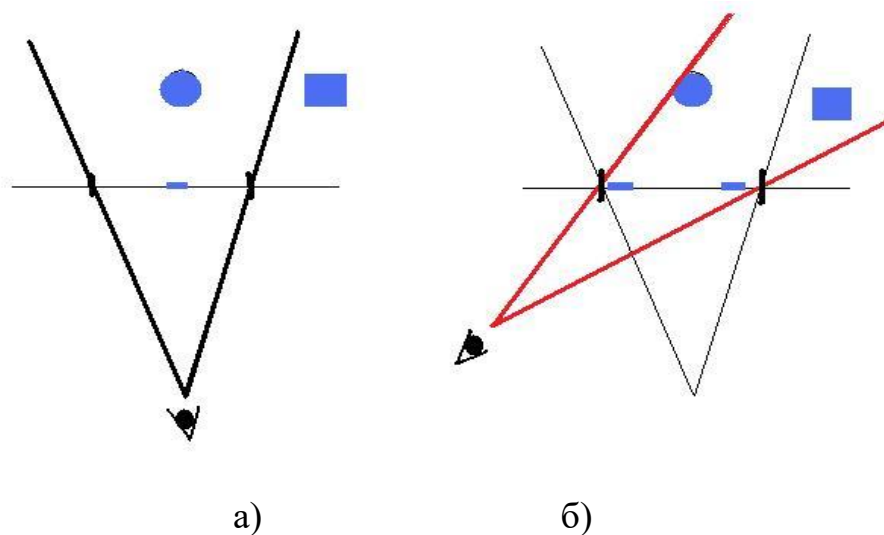


Рисунок 3.8 – Пример использования трекера положений для визуализации обстановки: а) космонавт находится перед центром экрана и видит только один объект в центре иллюминатора; б) оператор сдвинулся влево, пирамида видимости перестроилась и оператор видит два объекта

Подсистема отображения комбинирует несколько текстур dx размера 256×256 текселей в текстуры увеличенного формата. На основе этих объединённых текстур генерируются четыре слоя, которые соответствуют различным уровням детализации проекции Меркатора и формируют подстилающую поверхность Земли [4].

Итоговое изображение состоит из нескольких слоев, которые перечислены ниже в порядке отрисовки (рисунок 3.9):

- звезды;
- четыре слоя подстилающей поверхности Земли;
- облачность;
- атмосферный лимб;
- модель Международной космической станции.

Сначала программа рисует каждый слой по отдельности, при этом расчет очередности, какой слой виден, а какой скрыт (позади) вычислительная система ПК делает один раз в самом конце, когда собирает все слои вместе. Это

позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку и обеспечить требуемую частоту обновления кадров [4].

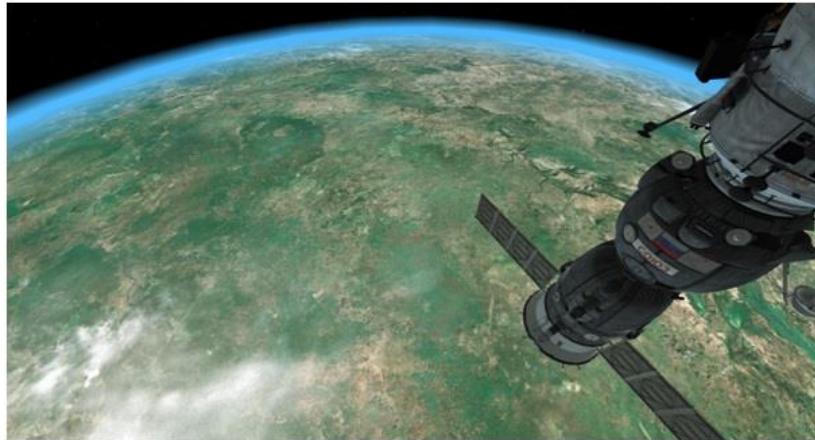


Рисунок 3.9 – Перспективное изображение внешней визуальной обстановки (на изображении видны подстилающая поверхность Земли с облачностью и атмосферным лимбом, а также элементы МКС, наблюдаемые из российского сегмента)

Для разработки цифровой модели «СПО ЦВМ Земли» использовалось следующее программное обеспечение, необходимое для функционирования программы:

- операционная система MS Windows 7 (64-bit);
- распространяемый пакет DirectX 9 June 2010;
- распространяемый пакет .NET Framework 4.5.2;
- распространяемый пакет Visual C++ 2015 x86.

Языки программирования, на которых написана программа
Исходным языком программирования является C++.

Среда разработки Microsoft Visual Studio 2015:

- наименование – Microsoft Visual Studio;
- версия – 2015.

Рассчитаем, каким минимальным количеством пикселей по ширине экрана должно обладать средство визуализации УРМ ВИН для адекватного отображения подстилающей поверхности. Введем обозначения N_{px} – количество пикселей по ширине экрана средства визуализации, TD_{mrx} – плотность (разрешающая способность) текстуры в м/пиксел, которая должна соответствовать зрительной системе человека в 117 м/пиксел и используем ранее введенные обозначения α_i – угол обзора от направления в надир, W – ширина полосы обзора наблюдаемой поверхности с высоты орбиты ПКК при полном угле обзора $2\alpha_i$. На рисунке 3.10 показан наблюдатель, смотрящий на экран, на котором симитировано изображение подстилающей поверхности Земли с высоты орбиты ПКК [21].

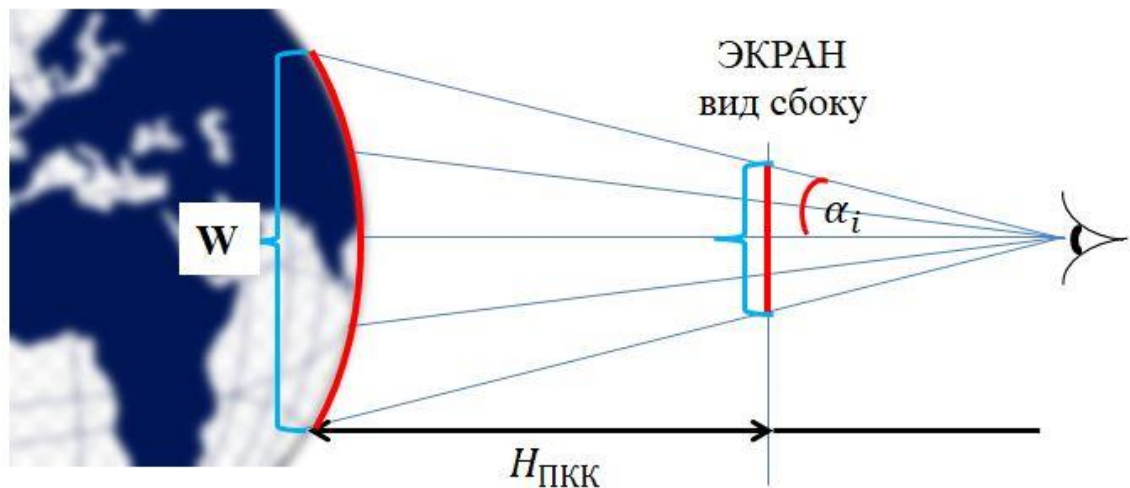


Рисунок 3.10 – Схема для расчета количества пикселей по ширине экрана для устройства визуализации имитатора УРМ ВИН

Исходя из рисунка 3.10: $tg\alpha_i = \frac{W/2}{H_{ПКК}} = \frac{TD_{mrx} \cdot N_{px}}{2 \cdot H_{ПКК}}$. Выразим N_{px} и подставляя значения, получим: $N_{px} = \frac{2 \cdot tg\alpha_i \cdot H_{ПКК}}{TD_{mrx}} = \frac{2 \cdot tg45^\circ \cdot 400000}{117} \approx 6837$.

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° (половина угла обзора от направления в надир составляет 45°) с $TD_{\text{мрх}}=117$ м/пиксел разрешение экрана должно составлять 6837 пиксел [21].

Опытным путем в ЦПК установлено, что при автоматической настройке штатного ФА Nikon D850 с объективом 400–800 мм, расстояние, на котором ФА автоматически фокусируется на наблюдаемой поверхности, составляет 1,7 метра. Для обеспечения условий устойчивой настройки автоматической фокусировки ф/а и угла обзора в 90° , устройство отображения должно располагаться на расстоянии 2 м от оператора. Соблюдение данного параметра является требованием, предъявленным к имитатору УРМ ВИН [21].

3.2 Синтез структуры имитатора универсального рабочего места для решения задач визуально-инструментальных наблюдений с борта ПКК в виде видеостены

На основании концептуальной и логической модели в 2022 году в ЦПК был создан имитатор УРМ ВИН («Тренажер ВИН»), в основе которого используется видеостена для визуализации изображения Земли и конструкции РС МКС и бортовой иллюминатор. Видеостена состоит из девяти телевизионных панелей с разрешением 4К, диагональю 75 дюймов каждая. Видеостена имеет суммарное разрешение 11520 на 6480 пикселей (3840 на 2160 пикселей одна телевизионная панель). Таким образом, при угле обзора $90\text{--}120^\circ$ видеостена позволяет имитировать наблюдение полосы обзора шириной 800–1200 км земной поверхности с высоты 400 км с разрешением 70–104 м/пиксел. Созданное устройство в виде космического тренажера ВИН является уникальным и не имеет аналогов в мире (рисунки 3.11, 3.12).

В процессе работы на УРМ «Тренажер ВИН», специалисты имеют возможность задавать условия занятий с учётом факторов, влияющих на выполнение процесса наблюдения, технически реализованных в средстве управления средой визуализации устройства. Кроме того, данное УРМ ВИН

позволяет использовать при работе космонавтов бортовую фотоаппаратуру [21].

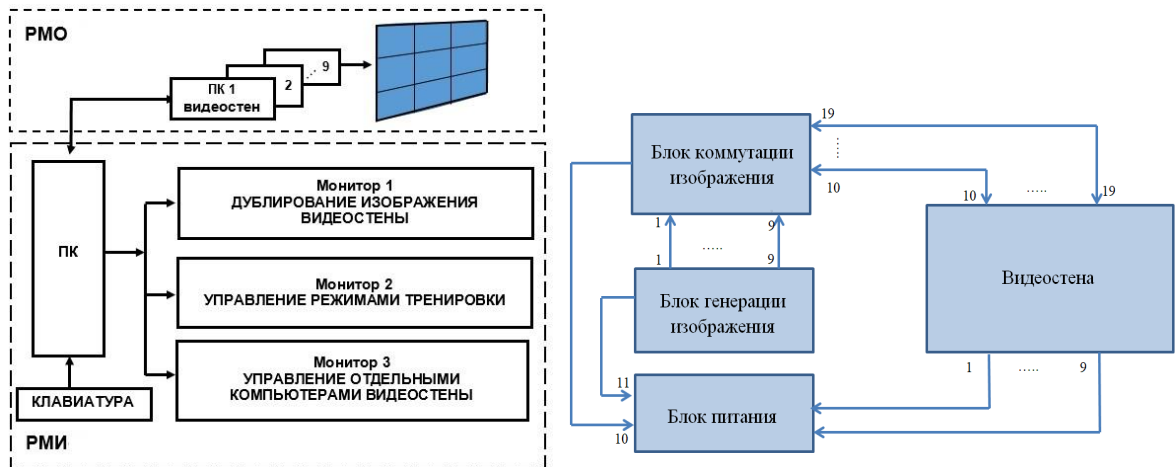


Рисунок 3.11 – Схема стенда имитатора УРМ ВИН («тренажер ВИН»)



Рисунок 3.12 – Общий вид «Тренажёра ВИН»

УРМ «Тренажер ВИН» позволяет [21]:

- имитировать поверхность Земли с адекватным разрешением;
- задавать любое наклонение орбиты от 0° до 100° ;
- отображать подстилающую поверхность до 85° по широте;
- использовать при подготовке штатную аппаратуру;
- отображать факторы, ухудшающие условия наблюдения и спецэффекты (пожары, пылевые бури, извержение вулканов);

– сократить сроки выработки навыков ориентирования и выполнения в полёте задач ВИН со среднестатистических 2-х месяцев до 3-х недель.

Проведение тренировок с использованием «Тренажера ВИН» позволило повысить вероятность обнаружения объектов наблюдения с борта МКС с 0,75 до 0,89 [21].

Данные подходы, использованные при создании имитатора УРМ ВИН, применимы при разработке и создании тренажеров для подготовки космонавтов по перспективным космическим программам: РОС и полетах к Луне [21, 105].

Для размещения телевизионных панелей используется жесткий каркас с размерами по длине, ширине, глубине соответственно 5029х3045х2221 мм. Каркас состоит из задней и передней стенок. Передняя стенка имеет размеры по длине и ширине соответственно 3360х1955 мм и располагается симметрично относительно центра задней стенки на расстоянии 2000 мм. Задняя и передняя стенки жёстко соединены между собой, всё пространство между ними (слева, справа и сверху) закрывается тёмной плотной тканью. Телевизионные панели закреплены на задней стенке каркаса и расположены в виде мозаики в три ряда по вертикали и горизонтали (матрица 3х3) внахлест. В верхнем и нижнем горизонтальных рядах центральная телевизионная панель закреплена на 45 мм впереди относительно левой и правой. В среднем горизонтальном ряду центральная телевизионная панель закреплена на 55 мм впереди относительно левой и правой. Телевизионные панели первого горизонтального ряда расположены так, что их нижняя часть на 15 мм расположена под телевизионными панелями второго горизонтального ряда. Верхняя часть телевизионных панелей третьего горизонтального ряда расположена на 20 мм под телевизионными панелями второго горизонтального ряда. Наклон телевизионных панелей верхнего и нижнего горизонтальных рядов равен 23° относительно точки наблюдателя, что позволяет расширить информационное поле наблюдателя на 20%. Блок генерации изображения формирует девять фрагментов изображения земной поверхности и передает их в блок коммутации изображения. В блоке коммутации изображения производится формирование

(сшивка) единого изображения земной поверхности, полностью адекватного реальному, которое космонавты наблюдают с борта МКС с учётом реальной высоты, трассы и скорости полёта, а также светотеневой обстановки и факторов определяющих условия наблюдения (облачность, дымка, конструктивные элементы МКС, пожары, пылевые бури, извержения вулканов и т.д.). На передней стенке закреплены панели, имитирующие интерьер служебного модуля РС МКС. На панелях располагается иллюминатор диаметром 420 мм, с возможностью вставки иллюминатора меньшего диаметра 230 мм. Иллюминатор находится по центру передней стенки на высоте 1560 мм. Точка наблюдения находится за иллюминатором на расстоянии 2300 мм от видеостены, для получения максимально приближенных условий наблюдения. «Точка наблюдателя», на которую смотрят экраны, является точкой пересечения перпендикуляров от центров экранов. На передней стенке расположена вертикальная балка, которая может смещаться вдоль стенки влево-вправо и фиксироваться. На балке размещен кронштейн, который может смещаться вверх-вниз вдоль балки и поворачиваться влево-вправо на 90°. На кронштейне фиксируется в удобном для наблюдателя положении оборудование – ноутбук, планшет, джойстик.

После включения и запуска блок генерации изображения (рисунок 3.11) формирует девять фрагментов изображения земной поверхности и передает их в блок коммутации изображения. В блоке коммутации изображения производится формирование (сшивки) единого изображения земной поверхности, полностью адекватного реальному, которое космонавты наблюдают с борта МКС с учётом реальной высоты, трассы и скорости полёта, а также светотеневой обстановки и факторов, определяющих условия наблюдения (облачность, дымка, конструктивные элементы МКС, пожары, пылевые бури, извержения вулканов и т.д.).

Использование видеостены для визуализации изображения позволило:

- расширить номенклатуру устройств воспроизведения изображений;
- отобразить подстилающую поверхность с разрешением 70–104

м/пиксел при угле обзора 90–120°;

- расширить информационное поле наблюдателя на 20% по высоте.

В состав информационного обеспечения УРМ ВИН входит:

- бортовая компьютерная модель полета «Сигма»;
- электронный каталог типовых объектов наблюдения;
- типовое полетное задание (программа ВИН) на текущую экспедицию;
- географический атлас;
- типовые радиогаммы на выполнение конкретных наблюдений;
- бортовая документация.

3.3 Синтез структуры имитатора универсального рабочего места для решения задач визуально-инструментальных наблюдений с борта перспективных ПКК с использованием технологии виртуальной реальности

На базе имеющейся ЦВМ Земли в ЦПК разрабатывается предложение по созданию УРМ ВИН РОС, которое предназначено для подготовки космонавтов к выполнению космических экспериментов и целевых задач в областях геофизических исследований и мониторинга Земли с борта РОС. Схема компоновки УРМ ВИН РОС представлена на рисунке 3.13.

При выборе наклона орбиты 96,9° станции РОС имеющуюся ЦВМ Земли нужно будет до модернизировать в части:

- добавления фотокарт для отображения северных территорий за пределами 85° северной широты;
- визуализации полярного сияния, явлений на горизонте – лимб и др.

Средство визуализации УРМ ВИН РОС создается на основе рассеивающего экрана и набора проекторов разрешением 4К и ПЭВМ формирователей изображения. Такое отображение обеспечивает бесшовное отображение информации на проекционном экране. По оценке, необходимое количество проекторов и ПЭВМ формирователей изображения по 11 штук

(число подлежит уточнению в ходе работ над конструкцией). Экран должен обеспечивать углы поля зрения при наблюдении в иллюминатор по горизонту до 100° и по вертикали около 90° . Такие углы обзора близки углам поля зрения зрительной системы человека без учета поворота головы. С учетом же поворота головы или НА потребуется существенно увеличить углы обзора до $170^\circ \times 170^\circ$.

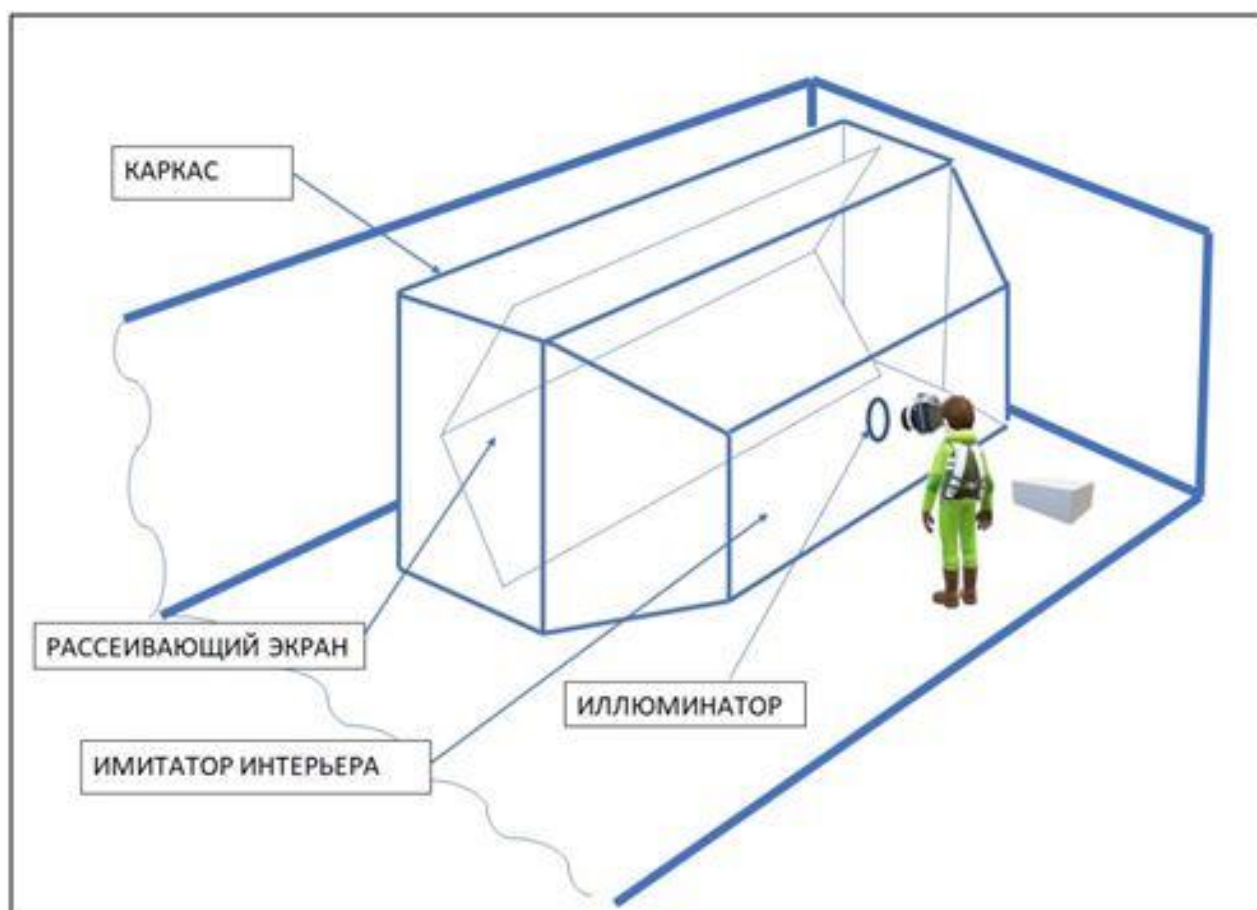


Рисунок 3.13 – Схема компоновки УРМ ВИН РОС

Расположение экрана от иллюминатора на расстоянии 3 метров позволяет использовать в тренировках фотокамеры с объективом 800мм (такая возможность подтверждена экспериментально с использованием штатной бортовой аппаратуры ФА Nikon D850 с объективом Nikkor 80–400 мм и Teleconverter TC–20E.)

Проекционный экран предлагается делать в виде сегмента отражающей сферы (рисунок 3.14).

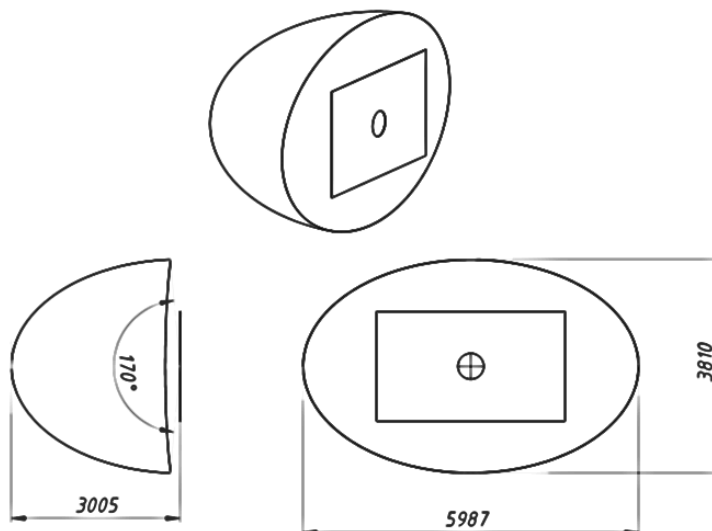


Рисунок 3.14 – Форма проекционного экрана

Имеющийся в ЦПК опыт создания и применения средств подготовки космонавтов ориентирован на обеспечение подготовки космонавтов к выполнению задач и организации его деятельности в условиях полета. Подготовка космонавтов к операциям на лунной поверхности имеет специфические отличия. Во-первых, это касается особенностей целевых задач, таких как картирование района посадки, геологическая разведка, развертывание научной аппаратуры, внешний осмотр оборудования и пр. Во-вторых, существенные отличия физических условий: шестикратно сниженная по сравнению с Землей гравитация, а также характерный для приполярных районов низкий угол Солнца над горизонтом, что существенно осложняет ориентацию. Отсутствие атмосферы исключает рассеивание света, приводя к формированию контрастных теней с резкими границами; освещение затененных участков возможно лишь за счет света, отраженного от соседних возвышенностей [96, 97, 103, 105].

Для разработки имитатора УРМ ВИН могут быть предложены две архитектурные схемы тренажеров на базе технологий виртуальной реальности (VR) [96, 97, 103]:

1 Проекционная система: визуализация виртуального информационного пространства (ВИП) посредством проецирования изображения проекторами на отражающий экран.

2 Шлемный дисплей: отображение ВИП через дисплеи, интегрированные в очки/шлем виртуальной реальности.

Для достижения адекватного восприятия виртуальной среды на УРМ ВИН ВР критически важно обеспечить соответствие визуализируемого изображения возможностям человеческого зрения. Для этого необходимо [96, 97]:

- обеспечить разрешение изображения, соответствующее пределу разрешающей способности зрительного анализатора человека (1 угловая минута);
- исключить или минимизировать негативное влияние на оператора задержки обновления изображения при движении головы/тела;
- исключить или минимизировать воздействие VR-гарнитуры на процесс аккомодации хрусталика глаза;
- обеспечить высокий уровень ощущения присутствия (эффект погружения).

Рассмотрим технические аспекты создания ВИП, соответствующего возможностям человеческого зрения, реализуемого как с использованием VR-очков, так и посредством проекции на экран. Как отмечено ранее, для проведения сравнительного анализа в качестве эталонного параметра зрительной системы человека примем её угловую разрешающую способность при стандартной остроте зрения и оптимальной освещенности равную одной угловой минуте ($1' = 1^\circ/60$). Данное значение эквивалентно плотности 60 пикселей на 1° угла обзора [96, 97].

Для реализации поставленной задачи был проведен анализ доступных на рынке систем отображения: VR-очки 4K (Pimax 4k [71]), VR-очки 8K (Pimax 8k VR [72]) и проекционный комплекс со сферическим экраном 240° (рисунок 3.15).

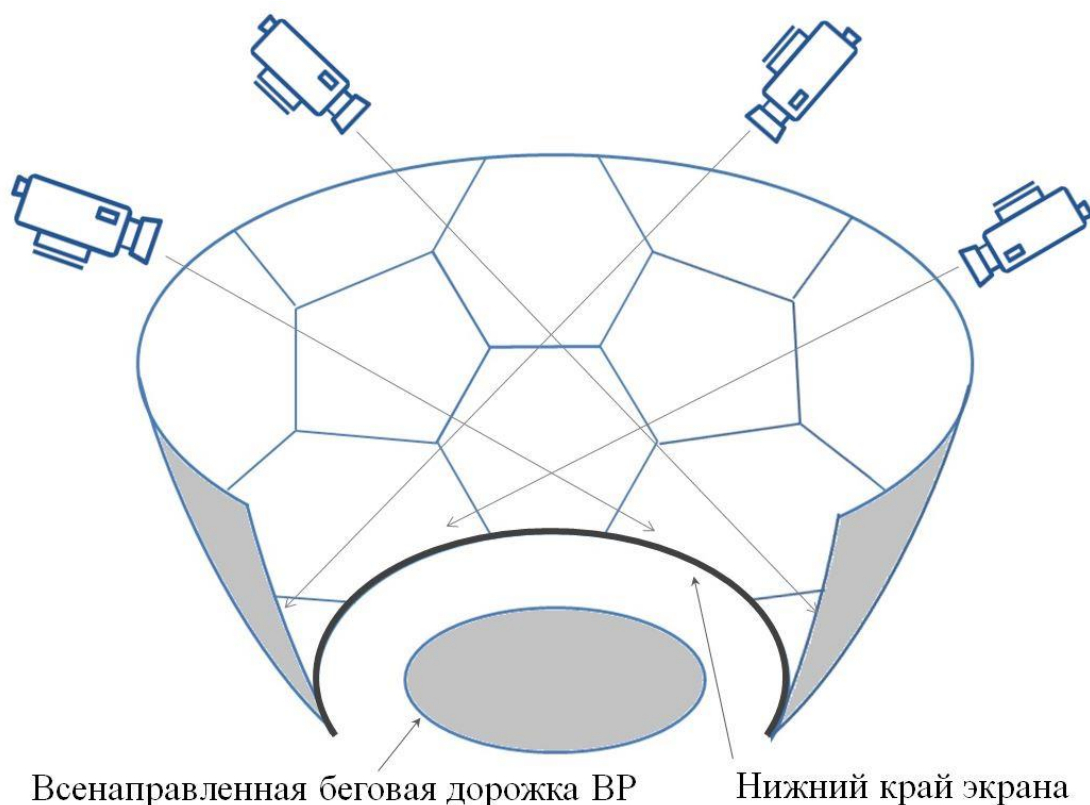


Рисунок 3.15 – Конфигурация системы проекторов для визуализации на панорамном сферическом экране

Область обзора VR-устройств ограничена бинокулярным полем зрения в диапазоне 110°–200° и разрешением дисплея на каждый глаз. Существует прямая зависимость: более высокое разрешение обеспечивает повышенную детализацию и реалистичность визуализации. В проекционных системах достижение разрешения, соответствующего зрению человека (60 пикселей на градус), реализуется масштабированием количества проекторов (рисунок 3.15). Сравнительные данные по пространственному разрешению, обеспечиваемому VR-устройствами 4K и 8K, а также проекционным экраном (60 пикселей на градус), представлены в таблице 3.2 [96, 97].

Таблица 3.2 – Анализ разрешающей способности VR-устройств 4K/8K для проекционных экранов

Средство отображения информации	Разрешение экранов (пиксел), N_{px}	Угол обзора, (градус), γ	Пикселей в одном градусе (пиксел), θ	Отклонение от нормы в 60 пикселей на градус
Очки виртуальной реальности 4K	1920×2160 пикселей на один глаз	110	17,5	в 3,4 раза
Очки виртуальной реальности 8K	3840×2160 пикселей на один глаз	200	19,2	в 3,1 раза

Для проведения расчётов введём обозначения: θ – плотность пикселей (пикселей на градус), γ – угол обзора (градусы), N_{px} – количество пикселей по горизонтали дисплея. Плотность пикселей рассчитывается по формуле:

$$\theta = \frac{N_{px}}{\gamma} \quad (3.3)$$

Проекционная система обеспечивает разрешение, соответствующее зрению человека ($\theta = 60$ пикселей на градус). Рассчитав по формуле плотность пикселей для VR-устройств, получаем, что их разрешающая способность существенно ниже (в 3,1–3,4 раза), чем у проекционного экрана [96, 97].

Дополнительным фактором при выборе устройства отображения является недостаточная изученность влияния VR-устройств на зрительную систему, пространственную ориентацию и вестибулярный аппарат человека. Отсутствие специализированных исследований не позволяет однозначно оценить безопасность их применения в подготовке космонавтов.

Как отмечается в исследовании [68], длительное использования VR-устройства способно вызвать состояние киберболезни (укачивания). Ключевой причиной этого явления выступают микрозадержки обновления изображения при движениях пользователя. Если при работе с обычным монитором (на расстоянии десятков сантиметров) этот эффект частично компенсируется периферическим зрением, сохраняющим связь оператора с реальным окружением, то в VR-устройствах, полностью перекрывающих поле зрения,

восприятие кардинально изменяется. В отличие от этого, проекционная система формирует стабильное изображение, практически независимое от положения тела оператора в пространстве [96, 97].

Влияние очков виртуальной реальности (ВР) на механизм аккомодации.

При использовании VR-очков визуальный горизонт воспринимается как удаленный, что формирует у мозга ожидание соответствующей работы цилиарных мышц хрусталика и глазодвигательного аппарата. Однако физически пользователь фокусируется на дисплее, расположенном в сантиметре от глаз. В естественных условиях резкость восприятия окружающего пространства обеспечивается динамической аккомодацией – непрерывной адаптацией точки конвергенции глаз и кривизны хрусталиков. В отличие от этого, дисплеи VR-устройств отображают резкими лишь те объекты, которые определены разработчиком. Предметы на других дистанциях (ближе или дальше) могут оставаться не в фокусе, что создает зрительный дискомфорт [68].

Преимущество проекционных сферических экранов [96, 97]. Размещение такого экрана на дистанции от 2 метров и более обеспечивает фокусировку глаз оператора на бесконечность. Переключение зрения на ближний план происходит только при необходимости работы с портативными приборами наблюдения и регистрации (фотоаппаратура, лазерные дальномеры, геодезическое оборудование, планшетные ПК и т.п.), что полностью соответствует естественной логике взаимодействия с подобной аппаратурой. Кроме того, данное расстояние до экрана позволяет интегрировать штатную или иную научную аппаратуру (НА) с помощью адаптеров, установленных на ее каналы наведения и регистрации, обеспечивая её корректную работу с проецируемым изображением.

Формирование эффекта присутствия в ВИП [96, 97]. Ключевым фактором достижения эффекта присутствия является задействование периферического зрения. Именно информация, поступающая с границ поля зрения, позволяет мозгу локализовать себя в пространстве и ощутить нахождение в конкретной

точке среды. Примечательно, что периферическое зрение обладает повышенной чувствительностью к движению объектов [68].

VR-очки имеют ограниченное поле обзора, предоставляя оператору лишь изображение, транслируемое на их дисплеи. Для создания убедительного эффекта присутствия необходимо формировать виртуальное изображение с углом обзора, соответствующим периферическому зрению человека и учитывающим естественную подвижность головы оператора.

Проекционный сферический экран способен обеспечить требуемую круговую панораму. В рамках поставленной задачи достаточен угол обзора 240° . Такой экран для панорамного отображения может быть реализован в виде сегмента полый сферы, аппроксимированного поверхностью усечённого икосаэдра [55, 87]. Элементами его поверхности служат пятиугольники и шестиугольники, причем каждый пятиугольник граничит исключительно с шестиугольниками, а в каждой вершине сходятся два шестиугольника и один пятиугольник (рисунок 3.15). Технология производства экрана относительно проста: сферическая поверхность формируется из отдельных сферических сегментов (рисунок 3.15), изготавливаемых из стеклопластика (стеклоармированного полимера). Для обеспечения жесткости по наружной стороне сегментов вдоль граней предусмотрены ребра. Геометрия сегментов (размеры и кривизна) рассчитываются согласно методике [55]. Сборка экрана осуществляется путем стыковки сегментов ребрами с последующим их скреплением. Рабочая поверхность покрывается светоотражающим материалом.

Концепция тренажера УРМ ВИН «Луна» на основе сферического экрана [96, 97]. Рассматривается вариант построения УРМ ВИН «Луна», в котором для формирования виртуального имитационного пространства используется рассеивающий сферический экран, геометрически выполненный в виде усеченного икосаэдра (рисунке 3.15).

Далее представлены расчёты ключевых характеристик системы отображения виртуального имитационного пространства, использующей проекционный сферический экран указанной конфигурации.

Учитывая назначение УРМ ВИН «Луна»: подготовку космонавтов к ориентированию и передвижению по лунной поверхности, – перемещение оператора в виртуальном пространстве предлагается осуществлять с помощью всенаправленной дорожки. При этом предполагается, что оператор будет ориентироваться преимущественно по ближайшим объектам виртуального рельефа, расположенными перед ним в секторе обзора от 30 градусов и ниже относительно линии горизонта (рисунок 3.16).

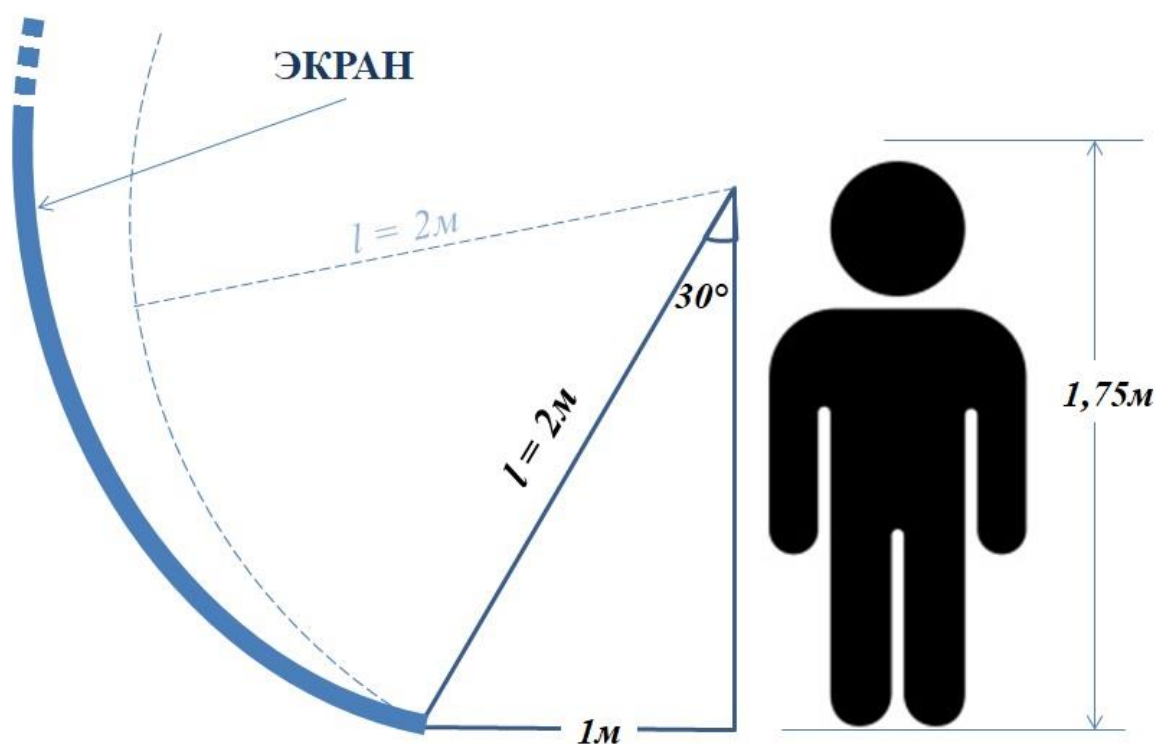


Рисунок 3.16 – Принципы пространственной ориентации оператора в напланетных условиях

При формировании изображения на сферическом экране (рисунок 3.16) критически важно учитывать, что требуемое разрешение напрямую зависит от дистанции до виртуальных объектов в сцене виртуального информационного пространства. Следовательно, наивысшее разрешение необходимо обеспечить для отображения ближайших к наблюдателю объектов, локализованных в передней нижней зоне экрана.

Расчёт требуемого разрешения в нижней зоне экрана. Участок виртуальной поверхности, отображаемый в нижнем секторе экрана при высоте обзора 175 см, угле наклона 30° и угле зрения 1° , имеет линейный размер 35 мм. Согласно проведенным вычислениям минимальный различимый объект с данной высоты и угла составляет 0.6 мм. Следовательно, для обеспечения достаточной детализации лунной поверхности при наблюдении с высоты человеческого роста 175 см, система проецирования должна гарантировать пространственное разрешение не менее 0.0006 метр на пиксел в указанной зоне экрана.

Полное погружение оператора в ВИП требует, чтобы отображаемое информационное пространство охватывало физиологические границы поля зрения человека. Учитывая его угловые параметры (вертикаль: вниз -60° , вверх $+55^\circ$, горизонталь $\pm 90^\circ$), проекционный экран должен обеспечивать обзор по вертикали не менее $\pm 60^\circ$ и по горизонтали не менее $\pm 120^\circ$ (рисунок 3.17). Интерпретация рисунка 3.17: на схеме голубым цветом обозначены границы поля зрения человека, а серым цветом – угловой охват, реализуемый проекционным экраном [97].

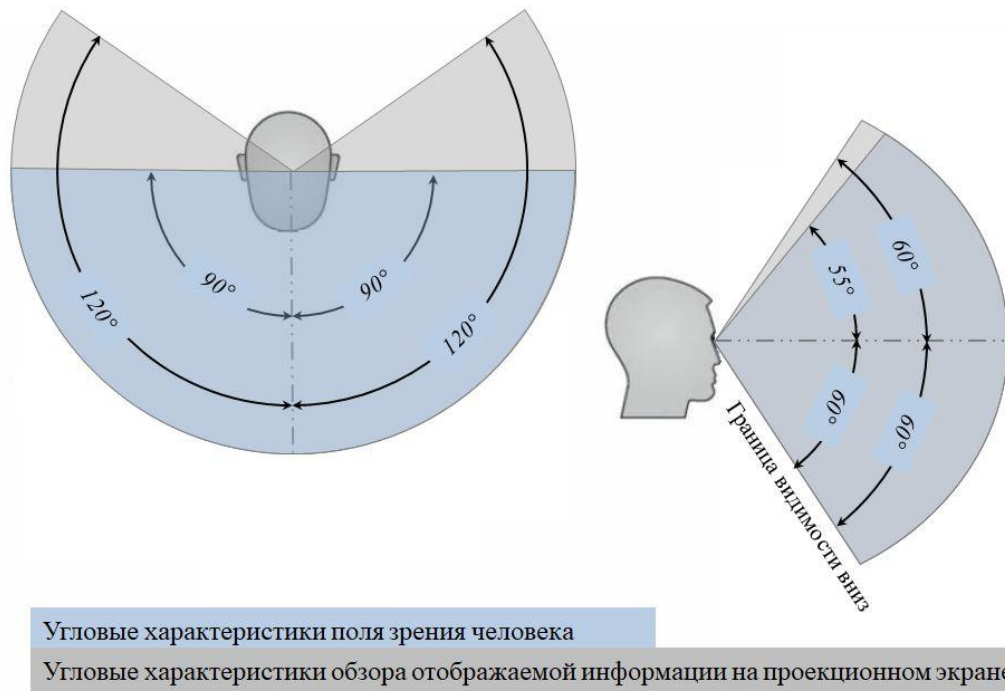


Рисунок 3.17 – Сопоставление угловых параметров человеческого зрения и проекционной системы

Расчёт пиксельной плотности нижней кромки экрана для 240° обзора (рисунок 3.18) [97].

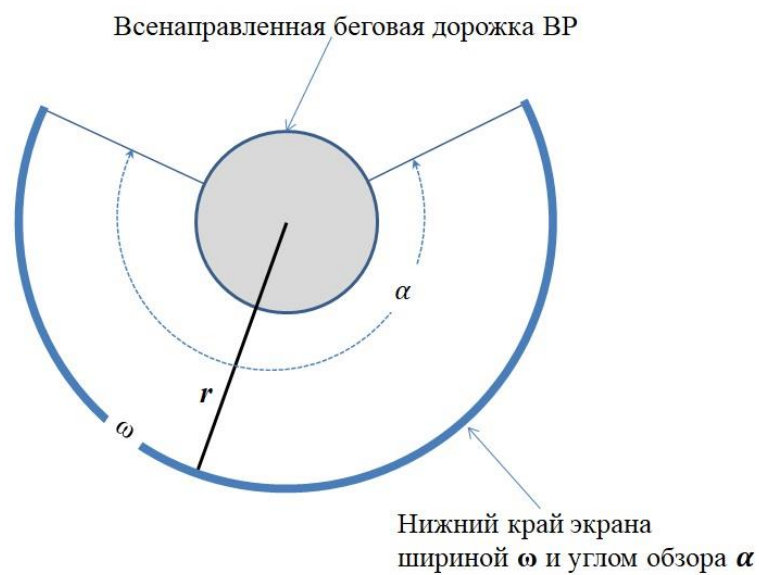


Рисунок 3.18 – Схема позиционирования оператора относительно нижней кромки экрана

Согласно схеме на рисунке 3.18 [97]:

$r = 1$ м – дистанция до нижнего края экрана;

ω – ширина нижней кромки;

$\alpha = 240^\circ$ – горизонтальный угол обзора;

$\rho = 0.0006$ пх/м – требуемое пространственное разрешение;

N_{px} – искомое количество пикселей по ширине нижней кромки.

Ширина ω определяется как длина дуги окружности радиусом r с центральным углом α :

$$\omega = \frac{\pi \cdot r}{180^\circ} \cdot \alpha = 4,19 \text{ м}$$

Необходимое число пикселей: $N_{px} = \rho \cdot \omega = 0,0006 \cdot 4,19 \approx 6983$ пх.

Требование: система визуализации должна обеспечивать минимальное разрешение 6983 пикселя по нижнему краю экрана.

Выбор проекционного оборудования [97]. Анализ рынка выявил соответствие проектора Epson EH-LS11000W 4K (аналог):

- технология: лазерный источник света;
- частотой кадров 120 Гц;
- критическая особенность: одновременное проецирование RGB-компонент, что исключает цветовые артефакты при синхронизации с затвором регистрирующей аппаратуры (фотокамеры), предотвращая монохромные снимки;
- базовые характеристики: разрешение 3840 на 2160, формат 16:9, диапазон диагонали 127–762 см, коэффициент проекции 1.35–2.84;
- критерии установки: коэффициент проекции >1.6 , дистанция >3 , расположение исключает затенение оператором/оборудование, минимальный зазор между VR-дорожкой и экраном, трансформация и сшивка изображений от нескольких проекторов (рисунок 3.19).

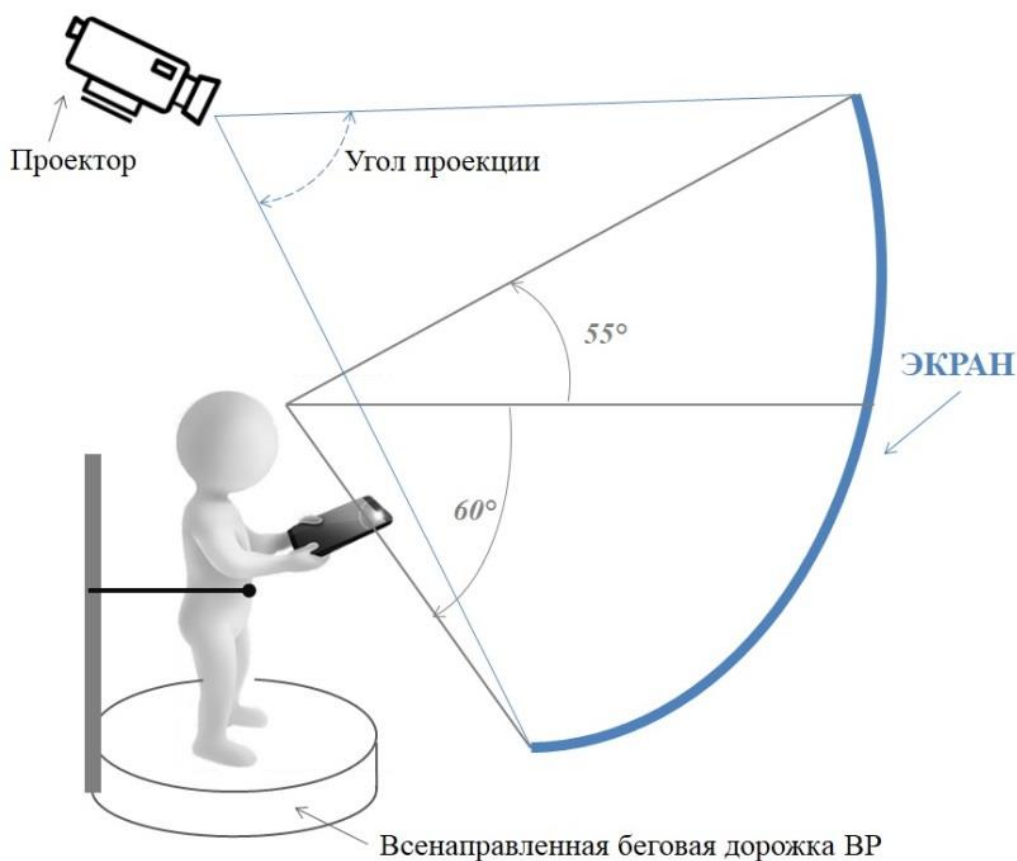


Рисунок 3.19 – Синхронизация ВИП на проекционном экране с полем зрения оператора

Расчёт конфигурации проекционной системы [97]. Для формирования изображения на экране с длиной нижней кромки $\omega = 4.19$ метров требуется определить количество проекторов с учётом оптимизации их характеристик. Конструкция экрана на основе усечённого икосаэдра предполагает расширение верхней зоны. Учитывая, что верхние сегменты отображают перспективно удаленные объекты, требования к разрешению может быть снижены по сравнению с критичной нижней частью. Решение: проекторы устанавливаются в ориентации 90° (вертикальное положение короткой стороны), пиксельный ресурс на короткой стороне 4K-проектора 2160 пикселей, требуемое разрешение по нижней кромке 6983 пикселей, минимальное количество проекторов 4 ($6983/2160 \approx 3,23$), суммарное разрешение $4 \times 2160 = 8640$ пикселей (с запасом 23,7%).

Концепция тренажёра УРМ ВИН «Луна» [50, 97]:

- выполнение измерений имитаторами геодезических приборов;
- фотосъёмка объектов с последующей геопривязкой;
- интеграция снимков в опорную карту через ГИС-интерфейс;
- при наведении прибора на экран отображается маркер визирования;
- позиционирование маркера осуществляется путем расчета пересечения линии визирования с поверхностью экрана и определение целевого объекта ВИП по координатам пересечения, или как альтернатива путём регистрации ИК-маркера камерой технического зрения и трекингом отраженного сигнала;
- процедура регистрации: оператор наводит маркер на объект, активирует кнопку «Регистрация», вычислительная система ПК определяет координаты объекта в ВИП и рассчитывает дистанцию до цели, затем происходит фиксация параметров ГИС с планшетом ПК.

Состав системы УРМ ВИН «Луна»: система визуализации ВИП (проекционный экран и мультипроекторная конфигурация 4×4К), система локомоции (всенаправленную VR-дорожку для навигации в ВИП), геонавигационное оборудование (штатные/имитируемые геодезические приборы, геологоразведочные инструменты), информационные ресурсы (планшетный ПК, опорные карты лунного полигона, космические снимки целевого района).

Ключевой задачей моделирования ВИП для тренажёра УРМ ВИН «Луна» является генерация физически корректной 3D-модели лунной поверхности с учетом [97]:

- микротопография (точное воспроизведение рельефа в зоне посадки);
- астрометрические параметры (позиции Солнца и Земли над горизонтом, динамика теней при вариациях азимута 0–360° и высоты светила);
- требуемой точке полигона в заданное время работ;
- видимость рельефа (учёт кривизны лунной поверхности);

- референсные данные (круговые панорамы с автоматических миссий, параметры геологических объектов: разломы, лавовые трубки, реголитовые поля).

Технология построения сцены [97, 103]:

- статистическое моделирование (процентное распределение объектов микрорельефа, вероятностное размещение кратеров, валунов, линеаментов, реголитовых структур);
- динамические элементы (следы роверов/скафандров с деформацией реголита);
- система вариативности (алгоритмы регенерации сцены для создания уникальных тренировочных условий).

Влияние лунной фотометрии на визуализацию полярного светового режима [1]. При малых углах Солнца ($<10^\circ$) наблюдается эффект оппозиции: резкое усиление яркости в направлении инсоляции (рисунок 3.18), и контрастная диссоциация: глубокие тени с освещенностью <0.01 люкс. Это обосновывается физически отсутствием атмосферной диффузии, индикатрисой рассеяния Хэпке для реголита, освещением теней исключительно за счет вторичного рассеяния.

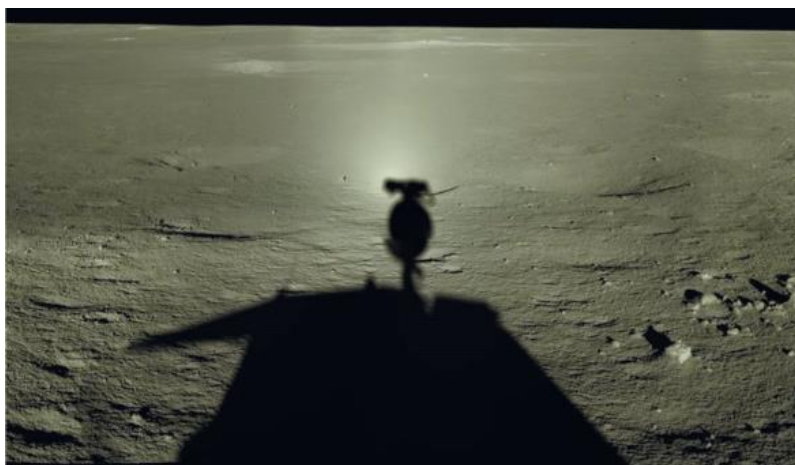


Рисунок 3.20 – Фрагмент панорамного изображения лунной поверхности, полученного камерой PCAM ровера Yutu-2 (миссии Chang'e 4) [CNSA/CLEP]

Верификация по данным миссии Chang'e (рисунок 3.20). Характеристики снимка следующие по направлению к Солнцу – пересвеченная область ($\Delta L > 95\%$), боковое освещение – оптимальная текстура ($0,2 < \text{контраст} < 0,5$), теневые участки – информационный вакуум ($\text{SNR} < 2$ дБ). Инженерные следствия для ВИП: обязательная реализация фотометрической модели с учетом угловой зависимости альбедо, нелинейного тонального отклика, порогов обнаружения в тенях.

Следует учитывать, что интенсивная боковая подсветка и рассеивание солнечного света лунным реголитом также способны существенно затруднить визуальную ориентацию операторов. В силу этого, разработка виртуальной имитационной среды должна включать моделирование как прямого солнечного излучения, так и эффектов светорассеяния на поверхности реголита.

Для достижения эффекта реального пребывания оператора на Луне необходимо реализовать динамическое обновление сцены ВИП в соответствии с его перемещением по беговой дорожке виртуальной реальности. Ключевыми аспектами здесь являются: визуализация появления объектов из-за препятствий, изменение их видимых размеров при движении, создание ощущения скорости за счет движения объектов в периферийной зоне зрения оператора и другие аналогичные визуальные эффекты.

Таким образом, можно сделать следующие выводы [97]:

- 1 При подготовке космонавтов к геологической разведке Луны требуется найти оптимальный баланс между теоретической подготовкой в лабораториях, отработкой навыков на земных учебных полигонах, имитирующих лунные условия, и тренировкам на специализированных тренажерах виртуальной реальности.

- 2 Для моделирования ВИП лунного посадочного полигона на УРМ ВИН «Луна» с пространственным разрешением, соответствующим возможностям человеческого зрения, наиболее эффективным решением является использование проекционных систем визуализации.

3 Анализ современных средств визуализации и практики их применения в Центре подготовки космонавтов при тренировках, позволяет выделить два подхода к созданию ВИП для лунных миссий:

- для задач пространственной ориентации предпочтительно использовать системы генерации изображений на базе панорамных или купольных проекционных экранов с применением проекторов 4К, которые позволяют достичь разрешения, адекватного зрению человека, в таком сценарии возможно использовать штатную научную аппаратуру или её имитаторы (использование VR-шлемов неэффективно из-за их ограниченного поля зрения и разрешающей способности в 3-4 раза хуже чем у проекционной системы);

- для задач, требующих моделирования тактильных ощущений взаимодействия, целесообразно применить системы генерации изображений и визуализации на основе VR-шлемов, так как они обеспечивают необходимый уровень иммерсивности для отработки мануальных операций с виртуальными объектами среды.

3.4 Оценка показателей качества и эффективности имитатора УРМ ВИН

Имитатор УРМ ВИН используется в первую очередь как техническое средство подготовки космонавтов, соответственно, для оценки его качества может применяться существующая система коэффициентов функционально-методической полноты и параметрической адекватности [59,60,61].

Для количественной оценки совершенства имитатора УРМ ВИН вычислим показатели параметрической адекватности, введенные в главе 1.

Вычисление значений коэффициента функциональной полноты $K_{ФП}$ осуществляется по формуле [59]:

$$K_{ФП} = \frac{N_{Hj}}{N_H} \quad (3.4)$$

где N_{Hj} – количество навыков, формирующихся на УРМ ВИН; N_H – общее число навыков, необходимых для выполнения операции ВИН.

Набор навыков ВИН, которые необходимо отработать на УРМ ВИН, определены путем анализа бортовой документации и учета опыта космических полетов.

Навыки, необходимых для выполнения операции ВИН:

1 изучение района расположения объекта и планирование сеанса ВИН;

2 выбор режима и параметров съемки;

3 подготовка средств ВИН;

4 обнаружение географических ориентиров;

5 обнаружение объектов-реперов;

6 обнаружение объекта;

7 наведение и захват объекта на сопровождение;

8 синхронизация движения линии визирования;

9 переход на режим детального наблюдения;

10 распознавание объекта;

11 компоновка кадра;

12 фокусировка объектива;

13 экспозамер в «тнях» и «светах»;

14 прецизионное наведение;

15 фотосъемка в режиме брекетинга;

16 пересылка цифровых снимков в ПК;

17 оперативная компьютерная обработка снимков;

18 экспресс-доклад по радиоканалу;

19 формирование сокращенного пакета данных;

20 формирование и сброс по каналу связи основного пакета данных.

Вычисление значения коэффициента методической полноты $K_{МП}$ осуществляется по формуле [59]:

$$K_{МП} = \frac{N_{Мj}}{N_M} \quad (3.5)$$

где $N_{Мj}$ – количество методических принципов, реализуемых на рабочем месте;
 N_M – общее число методических принципов.

Методические принципы, планируемые к реализации на имитаторе УРМ ВИН, включают в себя [91]:

- ранжирование навыков по значимости и сложности;
- учет индивидуальных психофизиологических особенностей обучаемого человека-оператора;
- ранжирование упражнений по принципу дозированного наращивания сложности с прерыванием тренировки для оперативного разбора ошибок (поэлементная отработка навыков по принципам «от простого к сложному», «от сложного к критическому режиму»);
- повторное воспроизведение элементов управления тренажерным средством;
- варьирование обучения в реальном и трансформированном масштабах времени (поэтапное изменение скорости выполнения операций: от замедленного к реальному, от реального к ускоренному, от ускоренного к реальному);
- обратная автоматизированная связь с индикацией (сигнализацией) ошибок обучаемого в реальном масштабе времени;
- самоконтроль действий обучаемого космонавта;
- регистрация деятельности оператора и функционирования управляемой системы;
- разбор ошибок обучаемого после тренировки с воспроизведением процесса тренировки в регулируемом масштабе времени;
- объективизация оценки качества выполнения тренировки (автоматическая оценка обученности оператора);
- архивация данных тренировки.

Из сопоставления данных видно, что методическая полнота не связана с функциональной полнотой. Очевидно, чем ближе имитируемая операция к реальной, т.е. чем больше значение коэффициента функциональной полноты, тем труднее реализовать методические принципы тренажерной подготовки.

Величина коэффициента параметрической адекватности $K_{\text{АД}}$ имитируемых средств и условий операции ВИН оценивается по формуле [59,62]:

$$K_{\text{АД}} = \frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}} \quad (3.6)$$

где $\Omega_{\min}$ и $\Omega_{\max}$ – соответственно меньшее и большее значения некоторого параметра, реализуемого на имитаторе УРМ ВИН и в реальной операции ВИН. Выбор такого соотношения обеспечивает относительную оценку реальных и имитируемых параметров.

Параметры операции ВИН, имитируемые на технических средствах, можно разделить на следующие группы:

- геометрические (высота полета, радиус зоны обнаружения, радиус зоны фотографирования, линейное разрешение глаза на местности, разрешение фотоаппарата на местности, площадь кадра на местности, диаметр иллюминатора);
- временные (угловая скорость линии визирования, располагаемое время на обнаружение, располагаемое время на фотосъемку, наблюдаемая угловая скорость движения изображения в окуляре и на экране монитора, скорость летательного аппарата);
- визуальные (контрастность объекта, яркость подстилающей поверхности и диапазон ее изменения, имитации облаков и теней от них, имитация изменений времен года);
- условия съемки (невесомость).

Показатели параметрической адекватности были скомпонованы в один интегральный коэффициент $K_{\text{ИН}}$ качества УРМ ВИН, который рассчитывается по следующей зависимости [62]:

$$K_{\text{ИН}} = \sigma_1 K_{\text{МП}} + \sigma_2 K_{\text{ФП}} + \sigma_3 K_{\text{АД}}, \quad (3.7)$$

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

Расчеты значений коэффициентов функционально-методической полноты, параметрической адекватности и интегральный коэффициент качества для УРМ ВИН разных поколений 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 3.4. Данные по экспертной оценке приведены в приложении Б.

Для оценки эффективности имитатора УРМ ВИН вычислим специальные критерии эффективности, введенные в главе 1.

Вычисление критерия экономической эффективности $K_{\text{ЭК}}$ осуществляется по формуле

$$K_{\text{ЭК}} = \frac{F(P)}{Z}, \quad (3.8)$$

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

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

$$F = F_1 + F_2, \quad (3.9)$$

$$F_1 = \Delta K_{\text{подг}} \cdot N_{\text{ЭК}} \cdot T \cdot M, \quad (3.10)$$

где $\Delta K_{\text{подг}}$ – повышение качества подготовленности члена экипажа за счет использования тренажера (рассчитано в главе 4 работы); $N_{\text{ЭК}}$ – число

российских членов экипажа, выполняющих ВИН на борту ПКК; T – время, затрачиваемое на выполнение ВИН одним членом экипажа в полете; M – стоимость 1 часа полета на борту ПКК;

$$F_2 = \Delta P_{\text{вин}} \cdot N_{\text{эк}} \cdot K_{\text{уст.нав.}} \cdot T \cdot M, \quad (3.11)$$

где $\Delta P_{\text{вин}}$ – повышение вероятности выполнения качественного сеанса ВИН в первые 2 месяца полета до появления устойчивых навыков выполнения ВИН (рассчитано в главе 4 работы); $K_{\text{уст.нав.}}$ – коэффициент учитывающий формирование устойчивого навыка ВИН через 2 месяца, если летает 2 экипажа он составляет 0,33 (4 месяца/12 месяцев $\approx$ 0,33), если летает один экипажа в год, то равен 0,17 (2 месяца/12 месяцев $\approx$ 0,17).

Вычисление критерия эффективности формирования деятельности ВИН на УРМ ВИН осуществляется по формуле

$$K_{\Phi} = P_{\Phi}(t)P_{\text{оп}}(t), \quad (3.12)$$

где $P_{\Phi}(t)$ – вероятность безотказного функционирования рабочего места, $P_{\text{оп}}(t)$ – вероятность нахождения объекта наблюдения.

$$P_{\text{оп}}(t) = P_{\text{обн}}(t)P_{\text{уд}}(t)P_{\text{с}}(t)P_{\text{кс}}(t), \quad (3.13)$$

где $P_{\text{оп}}(t)$ – вероятность обнаружения объекта наблюдения; $P_{\text{уд}}(t)$ – вероятность удержания объекта в объективе средства регистрации; $P_{\text{с}}(t)$ – вероятность получения снимка; $P_{\text{кс}}(t)$ – вероятность получения качественного снимка (объект в центре кадра, нет смаза).

Вычисление составного критерия эффективности осуществляется по формуле

$$\mathcal{E} = k_1\mathcal{E}_1 + k_2\mathcal{E}_2 + \dots + k_n\mathcal{E}_n, \quad (3.14)$$

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 введенные экспертами (космонавты и специалисты) путем последовательных сравнений (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Частные показатели эффективности и весовые коэффициенты составного критерия эффективности

Наименование показателя эффективности	Показатели эффективности (от 1 до 5)	Весовые коэффициенты
наличие подложки зима/лето	Ξ_1 5 – есть 1 – нет	$k_1 = 0,14$
информационное обеспечение (радиограмма, бортовая документация, БНО Сигма, географический атлас, интернет ресурс)	Ξ_2 5 – информационное обеспечение в полном объеме; 4 – представлено 4 позиции из 5; 3 – представлено 3 позиции из 5; 2 – представлено 2 позиции из 5; 1 – представлено 0–1 позиции из 5.	$k_2 = 0,14$
наличие факторов ухудшающих выполнение ВИН (ограничение поля зрения иллюминатором, элементами станции, светотеневая обстановка, атмосфера, и т.д.)	$\Xi_3 = \sum \phi_i$ $\phi_i = 1$ – есть, $\phi_i = 0$ – нет ϕ_1 – ограничение поля зрения иллюминатором; ϕ_2 – ограничение поля зрения элементами станции; ϕ_3 – светотеневая обстановка; ϕ_4 – влияние атмосферы; ϕ_5 – наличие спецэффектов.	$k_3 = 0,14$
реальность имитируемого изображения	Ξ_4 5 – имитируемое изображение выполнено на базе реальных космоснимков и имеет разрешение <i>не хуже</i> 120 м/пиксел 4 – имитируемое изображение выполнено на базе реальных космоснимков и имеет разрешение <i>хуже</i> 120 м/пиксел; 3 – имитируемое изображение выполнено на базе аэрокосмических фотоснимков; 2 – имитируемое изображение выполнено на базе аэрокосмических фотоплёнок; 1 – имитируемое изображение выполнено на базе отсканированных карт.	$k_4 = 0,3$

Таблицы 3.3 (продолжение)

возможность использования средства регистрации (штатного ФА, имитатора ФА, НА)	$\Xi_5 = \sum cr_i$ $cr_i = 1$ – есть, $cr_i = 0$ – нет cr_1 – имитатор средства регистрации по типу джойстик; cr_2 – имитатор на базе штатного ФА; cr_3 – возможность использовать штатный ФА; cr_4 – есть возможность отрабатывать действия с НА; cr_5 – отсутствует средство регистрации.	$k_5 = 0,14$
количество объектов детального наблюдения	Ξ_6 5 – неограниченное количество объектов детального наблюдения; 4 – точки детального наблюдения ограничены витком; 3 – больше 30 точек детального наблюдения; 2 – до 30 точек детального наблюдения; 1 – детальное наблюдение отсутствует.	$k_6 = 0,14$

Расчеты значений критериев эффективности для УРМ ВИН разных поколений 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 3.4.

Таблица 3.4 – Оценочные параметры имитаторов УРМ ВИН

Поколение ТСПК	$K_{ФП}$	$K_{МП}$	$K_{АД}$	$K_{ИН}$	$K_{ЭК}$	$P_{Ф}$	$P_{оп}$	$K_{Ф}$	Ξ
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

По значениям показателей параметрической адекватности для УРМ ВИН 2 и 3 поколения видим, что существующее и перспективное УРМ обладают высокими значениями, близкими к единице. Что говорит об достаточно высоком уровне совершенства данных УРМ.

Критерий экономической эффективности $K_{ЭК}$ для УРМ ВИН 1 и 3 поколения рассчитать невозможно. Для УРМ ВИН 1 поколения невозможно рассчитать из-за отсутствия информации по причине давности его использования. Для УРМ ВИН 2 поколения посчитан предполагаемый годовой экономических эффект, который составляет 450 млн рублей при повышении качества подготовки на 27% (глава 4), при затратах на создание УРМ 56 млн рублей; при этом значение критерия эффективности составляет 0,9, что близко к 1, что говорит о высокой эффективности данного УРМ. Для УРМ ВИН 3 поколения из-за того, что данное УРМ еще не реализовано можем лишь установить значение критериев, которые должны быть не хуже реализованного УРМ ВИН 2 поколения. Значение же составного критерия для УРМ ВИН 2 и 3 поколения подтверждает эффективность рассматриваемых УРМ, так как их значения близки к 5.

Выводы по Главе 3

1 Рассчитано разрешение зрительной системы человека с высоты полета МКС, для понимания каким разрешением должно обладать средство визуализации наблюдаемой поверхности создаваемого компьютерного имитатора УРМ ВИН.

2 Рассчитано, каким количеством пикселей экрана по ширине должно обладать устройство визуализации имитатора УРМ для адекватного отображения подстилающей поверхности с высоты полета МКС.

3 Разработана цифровая модель визуальной обстановки наблюдаемой поверхности с борта ПКК (логическая модель предметной области). Сформулированы требования к ЦВМ 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 имитатора инструментального средства наблюдения и регистрации (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 (представлено в приложение Б).

4 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. Дальнейшее развитие УРМ ВИН предусматривает использование перспективных компьютерных технологий на основании разработанной ЦВМ.

5 На основе введенных показателей параметрической адекватности $\Lambda_{\text{пар}} = \{K_{\text{ФП}}, K_{\text{МП}}, K_{\text{АД}}\}$ и критериев эффективности $\theta_{\text{ЭФ}} = \{K_{\text{ЭК}}, K_{\text{Ф}}, \text{Э}\}$ рассчитаны числовые значения введенных коэффициентов, позволяющие оценить качество и эффективность УРМ ВИН трех поколений (существующих и перспективных). На основании проведенных исследований экспертами (космонавты, имеющие опыт выполнения ВИН на борту ПКК и специалисты по ВИН) методом последовательных сравнений определены значения весовых коэффициентов, используемых в расчётах.

6 Впервые был посчитан 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 составляют 56 200 000 рублей.

ГЛАВА 4 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА ИМИТАТОРЕ УРМ ВИН

Для контроля уровня подготовленности космонавтов, в составе имитатора УРМ ВИН разработана и внедрена система автоматизированного контроля и оценивания качества операторской деятельности.

Система контроля и оценивания качества операторской деятельности построена на регистрации отклонений от норм и анализе ситуаций, в которых возникают эти отклонения.

Система контроля разрабатывалась на основе автоматизированной регистрации отклонений по схеме:

- 1 Обнаружение и регистрация отклонения;
- 2 Определение источника и причины отклонения;
- 3 Оценивание степени отклонения от нормы;
- 4 Сбор и накопление информации в базе данных;
- 5 Вычисление показателей качества операторской деятельности.

В качестве датчика отклонения линии визирования (ЛВ) «глаз оператора-объект» использована, в первом приближении, система позиционирования головы оператора, для регистрации: амплитуды скачка глаза, числа точек фиксации взгляда, среднего времени фиксации в точке, маршрут движения глаз при выполнении процедур поиска и обнаружения объекта невооруженным глазом.

При выполнении процедур наведения аппаратуры на объект для регистрации отклонений ЛВ прибора также используется система позиционирования, установленная на приборе.

Одним из факторов, определяющих сложность работы оператора, является расположение объектов наблюдения относительно трассы полета ПКК (рисунок 4.1).

Оценивание эффективности деятельности оператора имитатора УРМ ВИН основано на критериях, адекватно описывающих процесс деятельности.

Разработаны такие показатели и стандарты для определения характеристик полетных заданий, которые позволили бы фактические характеристики сравнивать со стандартными.

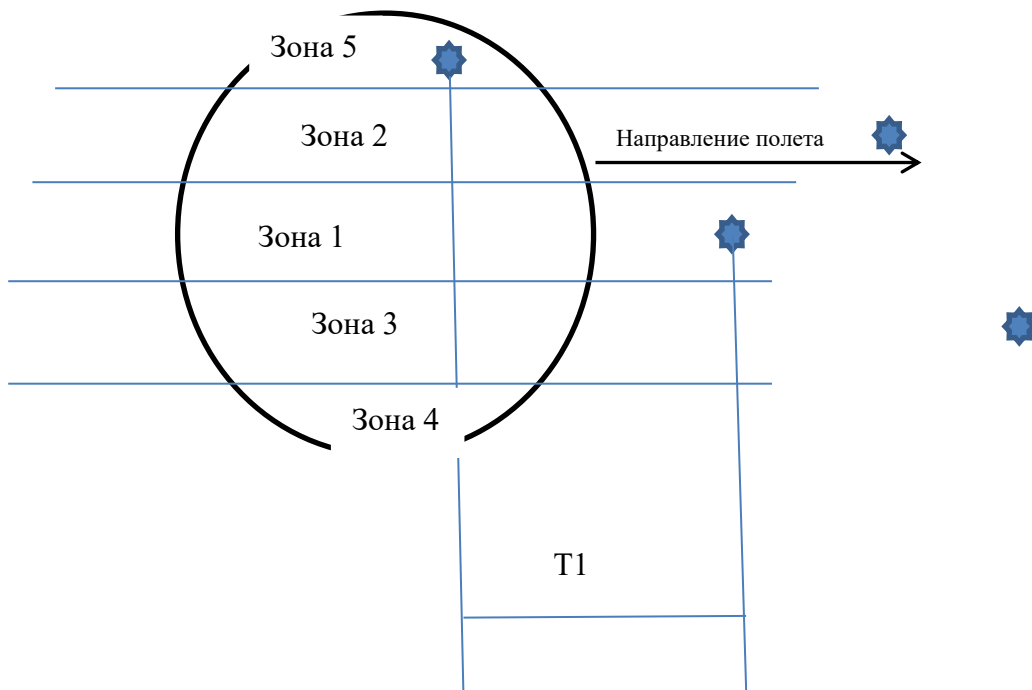


Рисунок 4.1 – Распределение зон сложности относительно трассы полета

Показателями оценивания называются количественные или качественные меры, характеризующие свойства деятельности оператора и позволяющие выносить оценочное суждение о них. В частном случае показателем может быть просто описание поведения космонавтов или результатов его работы.

Критерием оценивания называется совокупность условий, которым должны удовлетворять значения выбранных показателей оценивания и реализация которых определяет множество возможных исходов оценивания. Критерии оценивания, также как показатели, могут быть как количественными, так и качественными (описательными).

Стандарты являются областью допустимых значений показателей, конкретизирующей критерий оценивания.

Вся операция ВИН состоит из ряда процедур, имеющих свою специфику операторской деятельности, требующей выработки профессиональных навыков по их выполнению. В таблице 4.1 приведен перечень навыков оператора, необходимых для выполнения процедур операции ВИН [49].

Таблица 4.1 Перечень навыков космонавта, необходимых для выполнения процедур выполнения ВИН

№ п/п	Наименования навыков	Интегральные показатели	Функциональные показатели	Используемые средства, органы управления, ПО
1 этап	Первая фаза операции ВИН. Общие операторские навыки			
1.1	Получение радиограммы и уяснение задачи по тексту на экране монитора	время восприятия информации ($t_{ви}$, мин) объем воспринятой информации (%) ошибки восприятия	скорость управления ПК (клавиш/мин) скорость чтения (зн/мин)	портативный ПК
1.2	Изучение района расположения объекта и планирование сеанса ВИН	время восприятия информации ($t_{ви}$, мин) объем воспринятой информации (%) ошибки восприятия	скорость управления ПК (клавиш / мин) скорость чтения (зн/мин)	портативный ПК БД ПО «Сигма»
1.3	Учет прогнозируемых условий съемки, выбор режима и параметров съемки	время восприятия информации ($t_{ви}$, мин) объем воспринятой информации (%) ошибки восприятия	скорость управления ПК (клавиш/мин) скорость чтения (зн/мин) объем долговременной памяти	Портативный ПК БД ПО «Сигма»
1.4	Подготовка средства ВИН	время обслуживания ($t_{ви}$, мин) ошибки выставки параметров	скорость манипуляций (кнопок /мин)	средство ВИН кнопки управления меню ФА
2 этап	Вторая фаза операции ВИН. Профессиональные навыки визуально-инструментального наблюдения и фотосъемки			
1.5	Обнаружение географических ориентиров	вероятность обнаружения ($P_{го}$) время обнаружения ($t_{го}$, с)	амплитуда скачка глаза число точек фиксации взгляда среднее время фиксации в точке маршрута движения глаз	иллюминатор, $2\beta = 90^\circ$

Таблица 4.1 (продолжение)

1.6	Обнаружение объектов-реперов	вероятность обнаружения ($P_{ор}$) время обнаружения ($t_{ор}$, с)	амплитуда скачка глаза число точек фиксации взгляда ср. время фиксации в точке	видоискатель, $2\beta = 30^\circ$
1.7	Обнаружение объекта	вероятность обнаружения ($P_{об}$) время обнаружения ($t_{об}$, с)	амплитуда скачка глаза число точек фиксации взгляда ср. время фиксации в точке	
1.8	Наведение и захват объекта на сопровождение	вероятность захвата ($P_{зх}$) время захвата без потери цели ($t_{зх}$, с) ошибки наведения (σ_x^3, σ_y^3)	количество управляющих движений с перерегулированием по положению;	
1.9	Синхронизация движения линии визирования	время синхронизации ($t_{сх}$, с)	количество управляющих движений с перерегулированием по скорости	
1.10	Переход на режим детального наблюдения	вероятность перехода ($P_{пр}$) время перехода ($t_{пр}$, с)	отклонение перекрестия от центра объекта в канале с большими кратностями увеличения	переключатель «видоискатель – телескоп»
1.11	Распознавание объекта и признаков ЧС	вероятность распознавания ($P_{рп}$) время распознавания ($t_{рп}$, с)	количество точек фиксации глаз максимальное время одной фиксации	телескоп, $2\beta = 1^\circ$
1.12	Компоновка кадра	время компоновки (t_k , с)	количество поворотов фотокамеры	
1.13	Фокусировка объектива	время фокусировки (t_f , с)	количество управляющих движений с перерегулированием	
1.14	Экспозамер в «теньях» и «светах»	время экспозамера (t_z , с)		
1.15	Прецизионное наведение	время наведения (t_n , с) ошибки наведения (σ_x^H, σ_y^H)	количество управляющих движений с перерегулированием	
1.16	Фотосъемка в режиме брекетинга	величина смаза	амплитуда колебаний камеры в руках оператора; период колебаний	

Таблица 4.1 (продолжение)

3 Этап	Третья фаза операции ВИН. Общие операторские навыки.			
1.17	Пересылка цифровых снимков в ПК	время передачи ($t_{ПК}$, мин)	скорость управления ПК (клавиш/мин)	ФА портативный ПК
1.18	Оперативная компьютерная обработка снимков	время восприятия информации ($t_{ви}$, мин) объем воспринятой информации (%) ошибки восприятия	скорость управления ПК (клавиш/мин) скорость чтения (зн/мин) объем долговременной памяти	портативный ПК БД ПО обработки цифровых снимков
1.19	Экспресс-доклад по радиоканалу	время передачи сообщения ($t_{рк}$, мин)	скорость управления (клавиш/мин)	
1.20	Формирование сокращенного пакета данных	время передачи сообщения ($t_{рк}$, мин)	скорость управления ПК (клавиш/мин) скорость чтения (зн/мин) объем долговременной памяти	
1.21	Получение и изучение задания на сброс основного пакета	время восприятия информации ($t_{ви}$, мин) объем воспринятой информации (%) ошибки восприятия		
1.22	Формирование и сброс по каналу связи основного пакета данных	время формирования пакета ($t_{фп}$, мин) время передачи сообщения ($t_{рп}$, мин)		

В результате анализа деятельности космонавта-оператора, системы оценивания и контроля были сформулированы следующие контрольные параметры оценки операторской деятельности (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Контролируемые параметры операторской деятельности

№ п/п	Контролируемые параметры
1	Типы объектов
	– по размеру
	– крупные
	– средние
	– мелкие
	– по контрасту
	– высококонтрастные
	– среднеконтрастные
	– малоконтрастные

Таблиц 4.2 (продолжение)

2	Бег местности (восх./нисх)
	– 0°
	– 90° (270°)
	– 180°
3	Расположение объекта относительно подспутниковой точки
	– зона 1
	– зона 2
	– зона 3
	– зона 4
	– зона 5
4	Расстояние между траверсами объектов
	–
	–
	–
5	Дымка (3 уровня)
	–
	–
	–
6	Облачность (4 уровня)
	–
	–
	–
	–
7	Фокусное расстояние объектива
	– 400-600 мм
	– 800 мм
	– 1200 мм
	– 1600 мм
8	Сезон
	– лето
	– зима
9	Настройки фотоаппарата имитатора
10	Регистрация величины смаза через оценку величины угловой скорости ЛВ имитатора относительно направления на цель в момент нажатия кнопки спуск на ФА.
11	Быстрота обнаружения цели путем регистрации времени от момента появления цели на экране монитора рабочего места оператора (иллюминатора) до вхождения ЛВ. в установленную зону около цели (зона сопровождения).
12	Трек ЛВ при наведении на цель (характер проведения)
13	Регистрация синхронизации движения ЛВ с угловым движением цели
14	Прецизионное наведение имитатора (с максимальным фокусом объектива) на цель – количество управляющих движений с перерегулированием (возможно период колебаний)
15	Компоновка кадра – регистрация по факту совпадения с заданием или условием съемки)

Таблица 4.2 (продолжение)

16	Фиксация точки фотосъемки: Ручная регистрация: на треке проводки ЛВ имитатора отмечать точку фотосъемки по времени из прикрепленного к фотоснимку файла. Для этого необходимо время ФА синхронизировать с временем ПК имитатора УРМ ВИН.
17	Формирование и сброс пакета данных
	— время и правильность формирования пакета

Начальные условия (сложность задания), результаты операторской деятельности в процессе выполнения поставленной задачи, динамика наблюдения и дополнительные комментарии инструктора собираются, обрабатываются и хранятся в автоматизированных банках данных — информационной базе оценки операторской деятельности.

Методика позволяет рассчитать количественный показатель по оценке работы оператора на имитаторе УРМ ВИН. Каждый параметр, работа оператора с отдельным объектом и тест в целом оцениваются по пятибалльной системе от 1 до 5 с округлением результата с точностью до десятых [20, 102].

Результаты теста оцениваются по совокупности набранных баллов.

Оценка параметров работы оператора

Общая оценка работы оператора должна включать в себя следующие параметры [20]:

- полнота репортажа об объектах и выполняемых операциях;
- количество найденных объектов;
- качество фоторегистрации объекта (качество сопровождения, компоновка кадра, наличие смаза).

С целью учета значимости параметров работы оператора целесообразно каждому из рассматриваемых параметров присвоить свои весовые коэффициенты [102] (таблица 4.3), которые были введены экспертами (опытные космонавты и специалисты).

Критерии оценки параметров работы оператора приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.3 – 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 4.4 – 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, км	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 назвал объект; - не смог охарактеризовать объект; - оператор смог опознать до 20% ГО; - репортаж излагался несвязно и без должной последовательности	- оператор не вел репортаж

Оценка за тест в целом [102]

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

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

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.

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

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

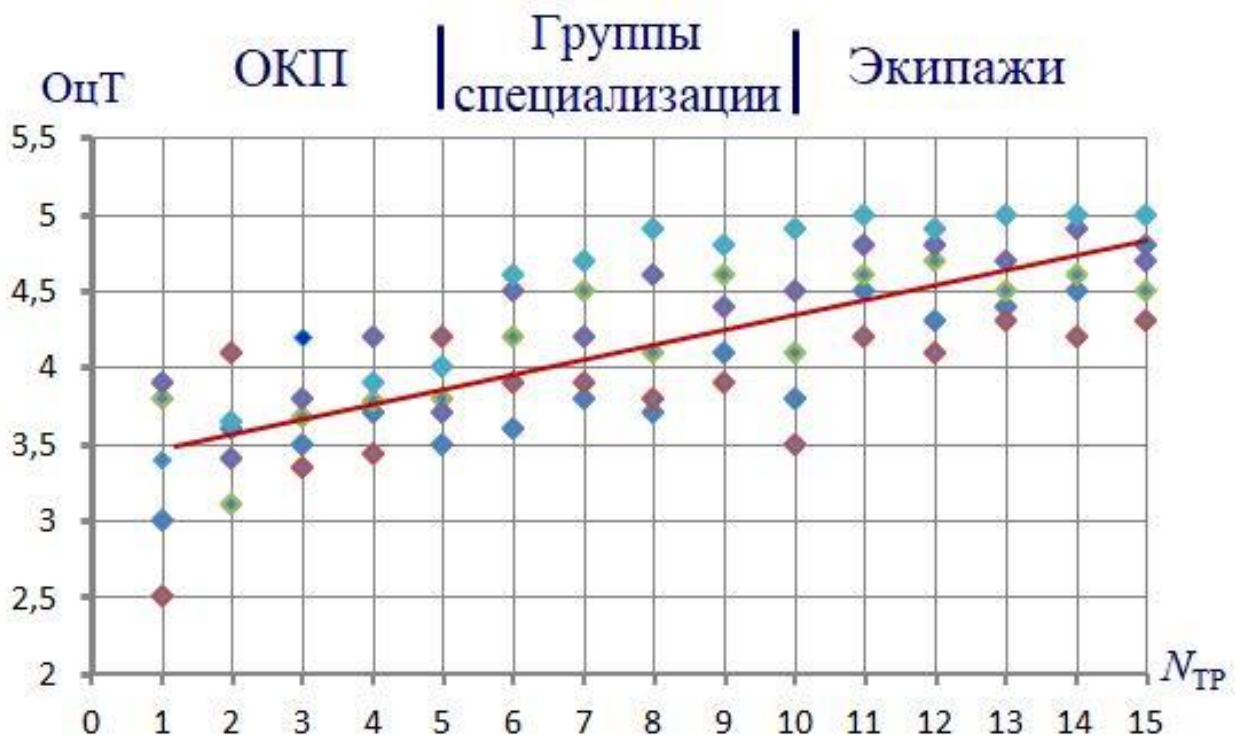


Рисунок 4.2 – Оценка операторской деятельности космонавтов
(кандидатов в космонавты) на имитаторе УРМ ВИН

На основании разработанной методики проведены исследования по оценке операторской деятельности по выполнению ВИН на имитаторе УРМ ВИН с космонавтами и кандидатами в космонавты. Для проведения экспериментальных исследований оценивалась работа 5-ти кандидатов в космонавты, 5-ти космонавтов в группе специализации без опыта выполнения космических полетов и 5-ти космонавтов в составе экипажей МКС без опыта полетов в период с 2023 по 2024 годы. С каждой группой была проведена подготовка на УРМ ВИН и было проведено по 5 занятий в рамках исследования. Результаты проведения экспериментальных исследований приведены на рисунке 4.2.

Был посчитан средний балл за каждую тренировку и путем аппроксимации графика функции была проведена линейная регрессия методом наименьших квадратов. Приближающая прямая описывается формулой:

$$y = k \cdot x + b, \quad (4.1)$$

где k – коэффициент наклона уравнения прямой, b – свободный член уравнения прямой.

Коэффициенты k и b определяются формулами:

$$k = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, b = \bar{y} - k \cdot \bar{x}, \quad (4.2, 4.3)$$

где x_i – значение аргумента (номера тренировки $N_{тр}$), y_i – соответствующие значения функции ОцТ, $\bar{x}$ – среднее значение аргументов, $\bar{y}$ – среднее значение функции.

Среднее арифметическое значений функций и аргументов вычислялись по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (4.4)$$

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 рассчитали $k \approx 0,1$, $b \approx 3,37$. Таким образом, приближающая прямая описана функцией $y = 0,1 \cdot x + 3,37$ и построена на рисунке 4.5. Расчеты приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Расчеты для записи уравнения линейной аппроксимации

$x_i = N_{\text{тр}}$	$y_i = \text{ОцТ}$	$x_i * y_i$	x_i^2	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})$
1	3,28	3,28	1	3,47	-0,19	0,0361	-0,89	0,7921	-7	49	6,23
2	3,56	7,12	4	3,57	-0,01	0,0001	-0,61	0,3721	-6	36	3,66
3	3,7	11,1	9	3,67	0,03	0,0009	-0,47	0,2209	-5	25	2,35
4	3,8	15,2	16	3,77	0,03	0,0009	-0,37	0,1369	-4	16	1,48
5	3,84	19,2	25	3,87	-0,03	0,0009	-0,33	0,1089	-3	9	0,99
6	4,16	24,96	36	3,97	0,19	0,0361	-0,01	0,0001	-2	4	0,02
7	4,22	29,54	49	4,07	0,15	0,0225	0,05	0,0025	-1	1	-0,05
8	4,22	33,76	64	4,17	0,05	0,0025	0,05	0,0025	0	0	0
9	4,34	39,06	81	4,27	0,07	0,0049	0,17	0,0289	1	1	0,17
10	4,16	41,6	100	4,37	-0,21	0,0441	-0,01	0,0001	2	4	-0,02
11	4,62	50,82	121	4,47	0,15	0,0225	0,45	0,2025	3	9	1,35
12	4,76	57,12	144	4,57	0,19	0,0361	0,59	0,3481	4	16	2,36
13	4,56	59,28	169	4,67	-0,11	0,0121	0,39	0,1521	5	25	1,95
14	4,64	64,96	196	4,77	-0,13	0,0169	0,47	0,2209	6	36	2,82
15	4,64	69,6	225	4,87	-0,23	0,0529	0,47	0,2209	7	49	3,29
120	62,5	526,6	1240			0,2895		2,8095		280	26,6

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

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.5)$$

Вычисляем суммы квадратов отклонений: $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 280$, $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \approx 2,8095$. Вычисляем сумму произведений отклонений: $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 26,6$. Рассчитываем коэффициент корреляции $r = \frac{26,6}{\sqrt{280 \cdot 2,8095}} \approx 0,9486$.

Оценим достоверность коэффициента корреляции, используя эмпирическое значение коэффициента Стьюдента:

$$t = |r| \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (4.6)$$

Проверим гипотезы:

$H_0: \rho = 0$ (корреляция отсутствует), $H_1: \rho \neq 0$ (корреляция значима).

Рассчитываем t -статистику: $t = |r| \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} = 0.9486 \cdot \sqrt{\frac{15-2}{1-0.9486^2}} \approx 10.8$.

Определяем критическое значение t -распределения:

Уровень значимости $\rho = 0,05$, степень свободы $df = n - 2 = 13$, критическое значение (двусторонний тест): $t_{\text{крит}} \approx 2,160$ (из таблицы Стьюдента).

Сравниваем t и $t_{\text{крит}}$: $|t| = 10,8 > 2.160$, следовательно гипотеза H_0 отвергается.

Вывод: 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 $t_{\text{крит}} = t(0,05; 13) \approx 2,160$. Таким образом, $t > t_{\text{крит}}$, 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.

Проанализировав график оценок операторской деятельности, видим, что средний балл за выполнение тренировок вырос с 3,5 до 4,8, что говорит о повышении качества подготовки на 27% $((4,8-3,5)/4,8=0,27)$.

В ЦПК был проведен эксперимент по анализу качества получаемых снимков с борта РС МКС от операторов, без опыта занятий на УРМ ВИН и прошедших курс подготовки на УРМ ВИН, в первые два месяца полета. Результаты анализа показали, что предварительная подготовка на УРМ ВИН

способствовала повышению вероятности получения качественных снимков с 0,75 до 0,89, что соответствует повышению качества получаемой информации на 14% [21].

Выводы по Главе 4

1 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 фоторегистрации объекта (качество сопровождения, компоновка кадра, смаз). Методика позволяет рассчитать количественный показатель по оценке работы оператора на УРМ ВИН по пятибальной системе с точностью до десятых.

2 На основании разработанной методики проведены исследования с космонавтами и кандидатами в космонавты по оценке качества операторской деятельности на имитаторе УРМ ВИН на всех трех этапах подготовки. Проведенные исследования по ООД показали [21]:

- повышение качества подготовки с использованием УРМ ВИН на 27%;
- повышение вероятности получения качественных снимков с борта РС МКС на начальном этапе полёта (2 месяца) на 14%;
- сокращение сроков выработки навыков ориентирования и выполнения в полёте задач ВИН со среднестатистических 2-х месяцев до 3-х недель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология создания имитатора универсального рабочего места для решения задач визуально-инструментальных наблюдений. Использование имитатора УРМ ВИН при подготовке космонавтов позволило повысить качество выполнения деятельности ВИН на борту МКС 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, состоят в следующем:

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 трёхуровневого 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 надир);
- 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 устройство визуализации имитатора УРМ для адекватного отображения подстилающей поверхности с высоты полета МКС.

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

7 Впервые разработана методика оценки операторской деятельности космонавта на имитаторе УРМ ВИН, которая включает в себя три параметра: полнота репортажа об объектах и выполняемых операциях, количество

найденных объектов, качество фоторегистрации объекта (качество сопровождения, компоновка кадра). Методика позволяет рассчитать количественный показатель по оценке работы оператора на УРМ ВИН по пятибальной 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%.

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 космонавтов 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

Разработанная технология создания имитатора универсального рабочего места для решения задач визуально-инструментальных наблюдений может быть использована при:

- формировании эргономических требований к модулям РОС, базирующихся на анализе опыта эксплуатации РС МКС космонавтами;
- разработке концепций развития перспективных технологий и средств

для отбора, подготовки и реабилитации космонавтов, необходимых для реализации российских пилотируемых программ до 2040 г.

Дополнительно, результаты интегрированы в программу подготовки по ВИН, начиная с экспедиции МКС-60, что подтверждается разработкой 16 организационно-методических документов [8, 9, 70, 80, 92].

Результаты исследований использованы при проектировании (сформировано ТЗ) перспективного УРМ ВИН под станцию РОС в рамках Государственного контракта 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 Земли.

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

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Бортовая документация	– вид специальной документации, которую космонавты используют в полете на борту пилотируемого космического комплекса и в которой прописаны алгоритмы действий экипажа по работе со служебными системами, научными экспериментами, транспортным кораблем, техническому обслуживанию оборудования станции, внекорабельной деятельностью [46]
Визуально-инструментальные наблюдения	– метод получения научной информации, основанный на визуальном поиске, обнаружении и идентификации изучаемых явлений с использованием специальной измерительной и регистрирующей аппаратуры, а также с применением инструментов, расширяющих возможности зрительного анализатора наблюдателя в процессе наблюдений [49]
Навык	– действие, сформированное путём повторения, характеризующееся высокой степенью освоения и отсутствием поэлементной сознательной регуляции и контроля [69]
Космический эксперимент	– совокупность взаимосвязанных операций, воздействий и наблюдений, направленных на получение научной информации об исследуемом объекте, явлении или технической системе в контролируемых условиях и проводимых в

условиях космического полета на борту космического аппарата с использованием специально разработанных для этого доставленного на борт научного оборудования [46]

Космонавт
Российской
Федерации

– гражданин Российской Федерации, выразивший желание участвовать в космических полетах, соответствующий профессиональным и медицинским требованиям, прошедший конкурсный отбор и подготовку к выполнению пилотируемых космических полетов в порядке установленном ГК «Роскосмос», и по результатам квалификационной аттестации принятый в подведомственном ГК «Роскосмос» учреждении на должность космонавта-испытателя для осуществления профессиональной деятельности (трудовой функции) в области испытаний и эксплуатации космической техники в условиях пилотируемого космического полёта или космонавта-исследователя для осуществления профессиональной деятельности (трудовой функции) в области проведения научно-прикладных исследований и экспериментов в условиях пилотируемого космического полёта [79]

Полетная операция

– комплекс мероприятий, осуществляемых экипажем, бортовой автоматикой, наземным центром управления полётом и бортовыми системами космического аппарата, направленный на реализацию конкретной целевой задачи [46]

- Полетная процедура – строго регламентированная последовательность операций, включающая перечень и порядок передачи команд между центром управления полетами и экипажем, описание действий членов экипажа на каждом этапе и алгоритм контроля работоспособности систем [46]
- Специализированный тренажёр – тренажёр, предназначенный для формирования у космонавтов навыков и умений для выполнения определенной полётной операции или задачи полёта [66]

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БД	– бортовая документация
БНО	– баллистико-навигационное обеспечение
ВАК	– Высшая аттестационная комиссия
ВИН	– визуально-инструментальные наблюдения
ВИП	– виртуальное информационное пространство
ВО	– визуальная обстановка
ВР	– виртуальная реальность
ГИС	– геоинформационная система
ГК «Роскосмос»	– Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»
ДЗЗ	– дистанционное зондирование Земли
ЗСЧ	– зрительная система человека
ИИСНР	– имитатор инструментального средства наблюдения и регистрации
ИК-маркер	– инфракрасный маркер
КЭ	– космический эксперимент
ЛВ	– линия визирования
МКС	– международная космическая станция
НА	– научная аппаратура
НИОКР	– научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа
НПИ	– научно-прикладные исследования и эксперименты
ОКП	– общий курс подготовки
ООД	– оценка операторской деятельности
ОцТ	– оценка за тест
ПК	– персональный компьютер
ПКК	– пилотируемый космический комплекс
ПО	– программное обеспечение

ПрО	– предметная область
ПТК	– пилотируемый транспортный корабль
РОС	– Российская орбитальная станция
РС МКС	– российский сегмент МКС
СИВО	– система имитации визуальной обстановки
СКПФ УМ	– система координатной привязки фотоизображений ультразвуковая многомодульная
СМ МКС	– служебный модуль РС МКС
СПК	– средства подготовки космонавтов
СПО	– специальное программное обеспечение
ТСПК	– технические средства подготовки космонавтов
УРМ	– универсальное рабочее место
ЦВМ	– цифровая визуальная модель
ЦПК	– Центр подготовки космонавтов
ЦУП	– Центр управления полетом
ФА	– фотоаппарат
ФКП	– федеральная космическая программа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов Г.А., Бережков А.В., Бессонов Р.В. [и др.] Служебная телевизионная система ка Луна-25 // *Астрономический вестник*. – 2021. – Т. 55. – № 6. – С. 601-617.
2. Академик Лев Зеленый о предыстории проекта "Луна-25" и его целях [Электронный ресурс] // *Российская Академия Наук: [сайт]*. – Москва, 2023. - URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=ba212996-e6d0-4175-9c20-e2348354e7fa> (дата обращения: 05.12.2023).
3. Акулов О.А., Медведев Н.В. Информатика: базовый курс: учебник для студентов вузов // – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Омега-Л, 2008. –574 с.
4. Бартош В.С., Белаго И.В., Дьяков М.С. [и др.] Особенности моделирования визуально-инструментальных наблюдений Земли с борта МКС // *Автометрия* – 2016. – Том 52. – №3. – С. 45-52.
5. Боднер В.Ф., Закиров Р.А., Смирнов И.Н. *Авиационные тренажеры* // – М.: Машиностроение, 1978. – 378 с.
6. Бодрунов С.Д. Авиационное тренажеростроение в России, история, современное состояние, перспективы развития // *Материалы научно-технической конференции «Тренажерные технологии и симуляторы – 2002»*, – СПб., 2002. – С.15–21.
7. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике // – М.: Радио и связь, 1984. – 287 с.
8. Вагнер И.В., Васильев В.И., Дедкова Е.В. [и др.] Особенности процесса подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений земной поверхности в ходе экспедиции МКС-63 // *Десятый международный аэрокосмический конгресс IAC'2021: сб. материалов*. – М., 2021. – С. 250-251.
9. Вагнер И.В., Юрченко Е.С., Дедкова Е.В., Фокин В.Е., Васильев В.И. Подготовка космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений земной поверхности // *Идеи и новации*. – 2022. – Том 10. –

№ 1-2. – С. 93-98.

10. Васильев В.И., Власов П.Н., Кудь-Сверчков С.В. [и др.] Опыт подготовки космонавтов к визуально-инструментальным наблюдениям с МКС с использованием летающей лаборатории = Vasiliev V.I., Vlasov P.N., Kud-Sverchkov S.V., Kuristyn A.A., Kharlamov M.M., Fokin V.E. Experience in Training Cosmonauts for Visual Instrumental Observations from the ISS Using the Flying Laboratory // 70nd International Astronautical Congress. Washington D.C., USA, 2019. – Paper IAC-19, B3.5.4x49668
11. Васильев В.И., Попова Е.В., Сабуров П.А. Основы создания и совершенствования технических средств подготовки космонавтов к выполнению научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 1(34). – С. 72-85.
12. Васильева Н.В., Фокин В.Е., Андронов Д.П. [и др.] Использование российских данных ДЗЗ при подготовке к выполнению визуально-инструментальных наблюдений с борта МКС // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России: сб. информ. материалов. – 2019. – Вып.2. – С. 60-66.
13. Васильева Н.В., Дедкова Е.В., Кутник И.В. [и др.] Проектирование стенда-тренажера для подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Том 28. – № 1. – С. 115-125.
14. Волков С.С. Методика оценки психофизиологического состояния операторов систем специального назначения // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26. – № 4. – С. 174-183.
15. Галимов Э.М. Состояние и перспективы исследования Луны и планет // Вестник Российской академии наук. – 2004. – Т. 74, – № 12. – С. 1059-1081.
16. Городецкий В.И. Элементы теории испытаний и контроля технических систем – Л.: Энергия, 1978. – 208 с.
17. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые

- технологии дистанционного зондирования Земли из космоса – М.: Техносфера, 2019. – 482с.
18. Дедкова. Е.В., Юрченко Е.С., Васильев В.И., Максимов С.Н., Шолохова И.А. Опыт реализации учебно-тренировочных полетов космонавтов на авиационные визуально-инструментальные наблюдения объектов территории Российской Федерации // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2023. – С. 90-92.
 19. Дедкова Е.В., Юрченко Е.С., Фокин В.Е., Максимов С.Н. Опыт реализации учебно-тренировочных полётов на визуально-инструментальные наблюдения с использованием самолета-лаборатории ТУ-134ЛК // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2019. – С. 139-140.
 20. Дедкова Е.В., Юрченко Е.С., Фокин В.Е., Максимов С.Н. Опыт организации и проведения контрольных тренировок на стенде «Тренажер ВИН» с использованием системы оценки операторской деятельности на этапе ОКП // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2023. – С. 83-86.
 21. Дедкова Е.В., Юрченко Е.С., Фокин В.Е. Создание тренажёра по подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений с борта международной космической станции с применением современных информационных технологий // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 4 (41). – С. 48-56.
 22. Демин Л.С., Жуковский Ю.Г., Семенин А.П. [и др.]; под ред. В.Е. Шукшунова Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
 23. Дикарев В.А., Сысоев В.В. Вероятностно-метрическая оценка

- адекватности математического моделирования радиотехнических систем при ограниченных натурных испытаниях // Радиотехника (Журнал в журнале). – 1999. – №3. – С. 72-76.
24. Дикарев В.А. Использование статистических критериев для оценки математического моделирования компьютерных технических систем практического обучения // Информационные технологии и системы. – Воронеж: ВГТА, 1998. – Вып. 2.
 25. Дикарев В.А. Методы оценки качества имитационного моделирования в тренажерах радиоэлектронных объектов // Вестник военного регистра. – 2002. – №1. – С. 22-28.
 26. Дикарев В.А. О возможности оценки адекватности математического моделирования иерархических систем // Всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения, посвященные памяти Н.Е. Жуковского»: сб. тезис. докл. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998.
 27. Дикарев В.А. О структуре навыков, приобретаемым летным составом на компьютерных технических системах практического обучения по задачам РЭБ // Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук, – Н.Новгород: НВЗРКУ ПВО, 1998.
 28. Дикарев В.А. Об одном аспекте формирования вторичных конфликтов качества применения тренажеров военного назначения // Вестник военного регистра. – 2001. – №10. – С. 33-37.
 29. Дикарев В.А. Обобщенный статистический критерий для оценки качества имитационного моделирования в тренажерах радиоэлектронных объектов // Вестник военного регистра. – 2002. – № 5. – С. 19-22.
 30. Дикарев В.А. Программное обеспечение качественного планирования тренажерной подготовки операторов // Вестник военного регистра, – 2002, – №5. – С. 20-23.
 31. Дикарев В.А. Программа планирования тренажерной подготовки

- специалистов эргатических систем (Schedule TR): Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001110938. – М.: Роспатент, 2001.
32. Дикарев В.А. Способ повышения качества применения тренажеров военного назначения // Вестник Военного Регистра. – 2001. – № 9. – С. 9-14.
 33. Дикарев В.А., Дидрих В.Е. Контроль деятельности педагогов «глазами обучаемых» // Открытое образование. – 2001. – №3. – С. 49-54.
 34. Емельянов В.В., Ясиновский С.И. Имитационное моделирование систем: учебное пособие / В.В. Емельянов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 584 с.
 35. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ [Электронный ресурс] // Система нормативных документов "Меганорм": сайт. – 2023. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763666.htm> (дата обращения 05.12.2023).
 36. Карачевцева И.П., Коханов А.А., Конопихин А.А. [и др.] Картографо-геодезические методы для характеристики посадочных площадок будущих российских миссий Луна-Глоб и Луна-Ресурс // Астрономический вестник. – 2015. – Т. 49. – № 2. – С. 100-116.
 37. Кононенко О.Д. Совершенствование профессиональной деятельности космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 2 (43). – С. 6-18.
 38. Концепция российской пилотируемой космонавтики на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Роскосмос: офиц. сайт. – URL: <https://www.roscosmos.ru/> (дата обращения: 05.12.2023). – (Документ доступен на сайте).
 39. Крамер Г. Математические методы статистики – М.: Мир, 1975. – 648 с.
 40. Крючков Б.И., Усов В.М., Сосюрка. Ю.Б, Троицкий С.С., Долгов П.П. Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при

осуществлении лунных миссий // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – №2(19). – С. 35-57.

41. Курицын А., Попова Е., Щербинин Д. Использование компьютерных тренажеров для подготовки космонавтов к выполнению программы научно-прикладных исследований 2018 = Kuritsyn A., Popova E., Shcherbinin D. Proceedings The use of computer-based simulators to train cosmonauts for the fulfillment of the program of scientific-applied research 2018 // International Conference on Engineering Technologies and Computer Science, EnT 2018. – Moscow, 2018.
42. Курицын А.А., Власов П.Н., Васильев В.И [и др.] Инновационные решения для проектирования тренажера визуально-инструментальных наблюдений с МКС / = Kuristyn A.A., Vlasov P.N., Vasiliev V.I., Fokin V.E., Kharlamov M.M., Kutnik I.V., Chub N.A., Vasilieva N.V. Innovative solutions for designing a training simulator for visual instrumental observations from the ISS. IAF Human Spaceflight Symposium (B3) Flight & Ground Operations of HSF Systems - Joint Session of the IAF Human Spaceflight and IAF Space Operations Symposia) // IAC-20, B3, 4-B6.4,6,x58610.
43. Курицын, А.А., Лончаков Ю.В., Корниенко М.Б. [и др.] Основные результаты подготовки и деятельности экспедиций МКС – 43/44/45/46 при выполнении годового плана полёта на РС МКС = Kuritsyn A. A., Lonchakov Yu.V., Kornienko M.B., Sivolap V.A., Sokhin I.G., Kovinsky A.A. Main results of training and activity of the ISS-43/44/45/46 expedition when carrying out the one-year mission plan aboard the ISS RS // 67nd International Astronautical Congress. – Guadalajara, Mexico, 2016 – Paper IAC-16.B3.5.3x32131.
44. Курицын А.А., Лончаков Ю.В., Крючков Б.И. [и др.] Новые подходы к подготовке космонавтов по программе научно-прикладных исследований и экспериментов на борту РС МКС = Kuritsyn A.A., Lonchakov Yu.V., Kruichkov B.I., Sivolap V.A., Saburov P.A., Sokhin I.G.

- New Approaches To Cosmonaut Training On The Program Of Scientific-Applied Research And Experiments Aboard The ISS Russian Segment // 66nd International Astronautical Congress Jerusalem, Israel, – 2015. – Paper IAC – 15.B3.5.2x28425.
45. Курицын А.А., Ярополов В.И. Пространственно-временная модель состояния орбитального пилотируемого комплекса // Пилотируемые полеты в космос, – 2014. – №3 (12). – С. 47-52.
 46. Курицын А.А., Харламов М.М., Хрипунов В.П. Система подготовки космонавтов в Российской Федерации – Звездный городок Моск. обл.: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А.Гагарина», 2020. – 317 с. – ISBN 978-5-9908008-3-0.
 47. Курицын А.А. [и др.]. Руководство по планированию и проведению тренировок экипажей МКС при выполнении интегрированного потока подготовки на комплексных тренажерах МКС – Звездный городок Моск. обл.: Войсковая часть 26266, 2008. – 56 с.
 48. Курицын А.А., Кутник И.В., Юрченко Е.С. Пути повышения эффективности деятельности космонавтов при выполнении программ научно-прикладных исследований // Сборник тезисов XLVII Академических чтений по космонавтике. – 2023. – С. 404-405.
 49. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В. Исследования Земли из космоса // Ленинград Гидрометеиздат, – 1987, – С. 400.
 50. Лунев Б.С., Красильников П.А., Иларионов С.А., Спасский Б.А., Наумов В.А. Картирование территории при проведении геоэкологического мониторинга средствами ГИС // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11(1). – С. 89-93. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35483> (дата обращения: 11.08.2021).
 51. Макаров И.М. [и др.]. Теория выбора и принятия решения – М.: Наука, 1982. – 287 с.
 52. Макарова С.М., Падалко С.Н., Строгонова Л.Б., Терентьев М.Н. Непрерывный круглосуточный медицинский контроль

- психофизиологического состояния и координат космонавтов с использованием беспроводной сенсорной сети // Вестник Московского авиационного института. – 2012. – Т. 19. – № 2. – С. 177-181.
53. Mapping of the territory during geoeological monitoring by means of GIS / B.S. Lunev, P.A. Krasilnikov, S.A. Ilarionov, B.A. Spassky [et al.] // Fundamental Research. – 2014. – № 11(1). – P. 89-93.
 54. Межведомственный перечень технологий создания и использования перспективных космических средств различного целевого назначения, направленных на реализацию приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ на 2013- 2016 годы. – М., 2013.
 55. Моцарь П.И., Зинченко В.П., Корчин И.А. Анализ применения средств отображения в системах визуализации авиационных тренажеров // Системи обробки інформації. – 2006. – випуск 9 (58). НПО «АВИА», Кременчуг, 2ЦНИИ ВВТ ВС Украины, Киев.
 56. Наумов Б.А., Хрипунов В.П., Путилин Д.В. Тренажерные комплексы. Достоинства и недостатки создания и эксплуатации. // Пилотируемые полеты в космос. – 2017. – № 2 (23). – С. 29-36.
 57. Наумов Б.А. Интеллектуальные тренажерные комплексы как эффективное средство решения многофункциональных задач подготовки космонавтов // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 4. – С. 39-43.
 58. Наумов Б.А. К вопросу о теории космического тренажеростроения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 81-84.
 59. Наумов Б.А. Космические тренажеры – Звездный городок Моск. обл., – 2013. – 216 С.
 60. Наумов Б.А., Хрипунов В.П., Сосюрка Ю.Б. Методические подходы к обоснованию выбора технических решений по созданию и рекомендации технических средств подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в

космос. – 2022. – № 4 (45). – С. 23-35.

61. Наумов Б.А. Некоторые методы оценок достаточности тренажерных средств подготовки космонавтов // Профессиональная деятельность космонавтов и пути повышения ее эффективности: материалы Междунар. научн.-практ. конф. – Звездный городок Моск. обл.: Изд-во ЦПК имени Ю.А. Гагарина, – 1993. – С. 102-107.
62. Наумов Б.А. Обоснование выбора комплексного показателя для оценки качества космических тренажеров // Космонавтика и ракетостроение, – 2011. – № 3. – С. 103-106.
63. Наумов Б.А. Особенности классификации технических средств подготовки космонавтов // Материалы XXXVI общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю.А. Гагарина. – Гагарин, – 2008. – С. 19-21.
64. Наумов Б.А. Разработка модели системы качества процесса создания, испытаний и эксплуатации космических тренажеров // Материалы XXXIX научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, – 2004. – С. 212.
65. Наумов Б.А. Современная концепция разработки космических тренажеров // Космонавтика и ракетостроение. – 2011. – Вып.3. – С. 174-179.
66. Наумов Б.А. Технические средства подготовки космонавтов // Полет. – 2008. – № 4. – С. 7-14.
67. Наумов Б.А. Формирование методического обеспечения для оценки эксплуатационных характеристик технических средств подготовки космонавтов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 25-28.
68. Нейробиология против виртуальной реальности [Электронный ресурс] // Хабр. Сообщество IT-специалистов: [сайт]. – 2023. – URL: <https://habr.com/ru/companies/asus/articles/378801/> (дата обращения 05.12.2023).
69. Новиков А.М. Методология учебной деятельности – М.: Эгвес,

– 2005. – 132 с.

70. Новицкий О.В., Кондрат А.И., Несмеянов В.В., Сабуров П.А. Основные результаты подготовки и деятельности командира ТПК «Союз МС-18» (бортинженера 65-й экспедиции МКС) и участников космического полета 65-й экспедиции МКС при выполнении программы космического полета // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 1(42). – С. 5-30.
71. Очки виртуальной реальности Pimax 4k VR [Электронный ресурс] // irift: [сайт]. – 2019. – URL: <https://irift.ru/product/ochki-virtualnoj-realnosti-pimax-4k-vr> (дата обращения 05.12.2023).
72. Очки виртуальной реальности Pimax 8K VR [Электронный ресурс] // irift: [сайт]. – 2019. – URL: <https://irift.ru/product/ochki-virtualnoj-realnosti-pimax-8k-vr-s-kontrollerami> (дата обращения 05.12.2023).
73. Петелин Д.А., Сафронова К.П., Белявский А.Е. Основные показатели оценки качества тренажеров и тренажерных комплексов // Авиация и космонавтика: Тезисы 20-ой Международной конференции. – М., 2021. – С. 353-354.
74. Петелин Д.А., Иванова А. Оценка компетентности космонавтов // I Гагаринские чтения 2024: сб. тез. работ Междунар. молодеж. научн. конф. – М.; Перо, 2024. – С. 433-434. – [Электронное издание].
75. Петелин Д.А. Оценка компетентности обучаемых космонавтов на примере тренажерных средств системы обеспечения (СОЖ) российского сегмента МКС // Чтения имени Валентины Владимировны Терешковой: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – Ярославль, 14-15 марта 2024г. – С. 10-15.
76. Петелин Д.А., Наумов Б.А. Формирование критерия качества тренажеров систем обеспечения жизнедеятельности // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Звездный городок Моск. обл.: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина», 2021. – С. 166-169.
77. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. – М.: Мир, 1981. – 286 с.

78. Подиновский В.В. Количественная важность критериев // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 5. – С. 110-123.
79. Положение о космонавтах Российской Федерации: утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 10 мая 2017 г. №551. – М., 2017.
80. Прокопьев С.В., Петелин Д.А., Кондрат А.И. [и др.] Основные результаты подготовки и деятельности 68-й и 69-й экспедиции МКС при выполнении программы космического полета // Пилотируемые полеты в космос. – 2024. – № 1. – С. 5-22.
81. Разумный Ю.Н. Введение в теорию оптимального проектирования спутниковых систем периодического обзора [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2009. – № 34. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8249>. (дата обращения: 05.12.2023).
82. Руководство по подготовке космонавтов. – Звездный городок Моск. обл.: РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2006. – 61 с.
83. Рюмин О.О., Савиных В.П., Фокин В.Е. [и др.]. Цветовые измерения в космосе / – М.: Машиностроение, 1996. – 176 с.
84. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденов А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2018. – № 103. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100782>. (дата обращения: 05.12.2023).
85. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов: учебное пособие – 3-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 572, [4] с. – ISBN 978-5-7038-4811-1.
86. Туманов А.В., Щеглов Г.А. [и др.]. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов: учебное пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 755, [5] с. – ISBN 978-5-7038-5134-0.

87. Усечённый икосаэдр [Электронный ресурс] // Википедия: [сайт]. – URL:<https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 05.12.2023).
88. Харламов М.М., Скрипочка О.И., Дмитриев В.Н. [и др.] Разработка многосегментной технологии подготовки космонавтов к полету на международную космическую станцию = Kharlamov M.M., Skripochka O.I., Dmitriev V.N., Kuritsyn A.A., Kutnik I.V., Chub N.A., Blinov O.V., Petelin D.A., Yurchenko E.V., Andreev E.V. Development of a multi-segment technology for training cosmonauts for flight on the international space station // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. – Сер. «IAF Human Spaceflight Symposium 2021» –Held at the 72nd International Astronautical Congress, IAC 2021. – Dubai, 2021.
89. Чаки Ф. Современная теория управления – М.: Мир, 1975. –245 с.
90. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
91. Шевченко Л.Е., Полунина Е.В., Саев В.Н. Методическое и информационное обеспечение деятельности оперативного персонала в системе управления тренировками тренажерного комплекса РС МКС // Пилотируемые полеты в космос. – 2019. – № 4 (33). – С. 48-57.
92. Шкаплеров А.Н., Дубров П.В., Кондрат А.И. [и др.] Основные результаты подготовки и деятельности 65-й и 66-й экспедиций МКС при выполнении программы космического полета // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 3(44). – С. 5-26.
93. Шукшунов В.Е. Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
94. Шукшунов В.Е. Тренажерные системы – М.: Машиностроение, 1981. – 256 с.
95. Шукшунов В.Е. Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
96. Юрченко Е.С., Васильев В.И. Анализ возможностей систем, формирующих визуальное информационное пространство для

- тренажеров отработки задач напланетных миссий // Материалы 59-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Ч. 2. – Калуга, 2024.
97. Юрченко Е.С., Васильев В.И. Концептуальные основы построения тренажеров с применением технологий виртуальной реальности для отработки поисково-разведочных задач на поверхности Луны // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 4 (49). – С. 58-76.
 98. Юрченко Е.С. Опыт разработки, модернизации и эксплуатации стандарта-тренажера «Тренажер ВИН» // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2023. – С. 208-210.
 99. Юрченко Е.С., Дедкова Е.В. Опыт разработки и создания стандарта-тренажера по подготовке космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений с борта РС МКС с применением современных информационных технологий // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2021. – С. 119-121.
 100. Юрченко Е.С., Торгашев Р.Е., Дедкова Е.В., Максимов С.Н. Основные принципы выбора территорий при наблюдении типовых объектов природно-антропогенных ландшафтов России для учебно-тренировочных полетов на СЛ Ту-134 ЛК // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2019. – С. 137-138.
 101. Юрченко Е.С., Васильев В.И., Васильева Н.В., Фокин В.Е., Дедкова Е.В., Бирюкова И.А., Максимов С.Н. Применение современных информационных технологий при подготовке космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений земной поверхности с борта РС МКС // Пилотируемые полеты в космос. – 2015. – № 3(16). – С. 83-91.
 102. Юрченко Е.С., Фокин В.Е., Васильева Н.В., Дедкова Е.В.,

- Максимов С.Н. Разработка методики оценки операторской деятельности кандидата в космонавты по результатам тренировок на «Тренажере ВИН» // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIII Международной научно-технической конференции. Звездный городок Моск. обл., 2019. – С. 136.
103. Юрченко Е.С., Васильев В.И. Разработка предложений по созданию специализированного тренажера виртуальной реальности для подготовки космонавтов к реализации напланетных миссий // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XV Международной научно-технической конференции. Звездный городок Моск. обл., 2023. – С. 200-202.
 104. Юрченко Е.С., Васильев В.И., Васильева Н.В., Бондарев Д.А. Технические решения по модернизации стенда «Тренажер ВИН» в 2019-2020 годах // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2019. – С. 135.
 105. Юрченко Е.С., Дедкова Е.В., Васильев В.И., Васильева Н.В. Обоснование и разработка исходных данных специализированного тренажера виртуальной реальности для отработки задач ориентирования на поверхности Луны в ходе реализации лунных миссий // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2021. – С. 117-119.
 106. Юрченко Е.С., Курицын А.А., Дедкова Е.В., Васильев В.И., Фокин В.Е., Максимов С.Н. Опыт организации и проведения учебно-тренировочных полётов космонавтов на визуально-инструментальные наблюдения объектов Крымского полуострова и Кавказского региона с использованием самолета-лаборатории ТУ-134ЛК // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Звездный городок Моск. обл., 2021. – С. 123-124.

107. Ярополов В.И. Подготовка космонавтов к действиям в нештатных ситуациях: учебное пособие – Звездный городок Моск. обл.: РГНИИЦПК им. Ю.А.Гагарина, 1999. – 104 с.
108. Об образовании в Российской Федерации: федер. закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ (ред. от 24.03.2023) // Собрание законодательства РФ. – 2012. – № 53 (ч. I), ст. 7598.
109. ГОСТ 21036-75. Тренажеры. Термины и определения. – Введ. 1976-07-01 – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 9 с.
110. ГОСТ Р 52017-2023. Комплексы космические пилотируемые. Порядок подготовки и проведения космического эксперимента и целевой работы. – М.: Стандартиформ, 2023.
111. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Введ. 2019-07-01. – М.: Стандартиформ, 2018. – 81 с.

Приложение А Структура программы с описанием функций составных частей и связи между ними

1 Класс teleApplicaition

Главный класс teleApplicaition, его исходный код размещен в файлах:

- sources\Teleoperator\TELE.h,
- sources\Teleoperator\TELE.cpp.

В классе teleApplication создаётся и инициализируется экземпляр класса teleVINChannel (фрагмент исходного кода файла sources\Teleoperator\TELE.cpp).

```
VWIERERROR teleApplication::Init() {  
    ... // фрагмент кода опущен  
    vinChannel = new teleVINChannel(treeScene, earthViewer, additionalViewer,  
trajectoryTask, container, tooltips, hotkeyDispatcherTask->getEventsRegistrar(),  
applicationMode);  
    vwiAssert(vinChannel);  
    VWIGRAPHICSDEVICE->AddChannel(vinChannel);  
    ... // фрагмент кода опущен  
    return vwiApplication::Init();  
}
```


2 Класс teleVINChannel

Класс teleVINChannel отвечает за визуализацию текстурной информации подстилающей поверхности Земли, визуальных эффектов (в том числе облаков), звездного неба, лимба, земной атмосферы.

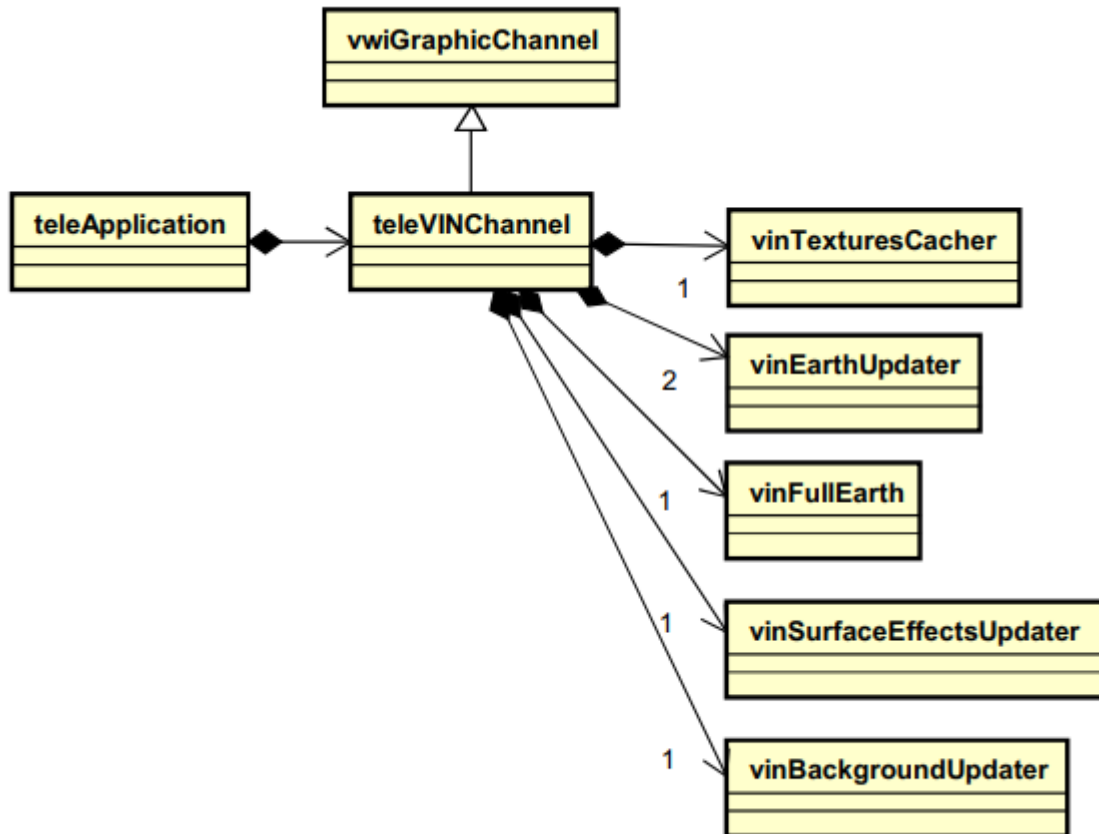


Рисунок А.1 – Классы teleApplication и teleVINChannel и связанные с ним классы (диаграмма классов)

Класс teleVINChannel представляет собой композитный класс, который содержит указатели на экземпляры других классов (фрагмент исходного кода файла sources\VIN\vinTextureUpdaterTask.h)

```

class teleVINChannel : public vwiGraphicChannel, public EventListener {
    vinTexturesCacher          *    texturesCacher;
    vinEarthUpdater            *    earthUpdater;
    vinEarthUpdater            *    cameraUpdater;
    vinSurfaceEffectsUpdater    *    surfaceEffectsUpdater;
    vinFullEarth               *    fullEarth;
private:
    vwiVector2 observationPointMain;
    vwiVector2 observationPointCamera;
    vinLevelsTexture           *    levels;
    vinBackgroundUpdater       *    backgroundUpdater;
    vinTrajectoryTask const* const trajectory;
    mainViewer* const earthViewer;
    cameraViewer* const additionalViewer;
    vinTreeScene const * const treeScene;
    TooltipsDispatcher* const tooltips;
    mainViewerUpdaterVinFov * m_pMainViewerUpdaterFov;
    mapsTypeEnum mapsType;
    bool bPrintServiceInfo = false;
    configuration::ApplicationMode applicationMode;
    vwiCriticalSection section;
... // фрагмент кода опущен
};

```

Таблица А.1 – Краткое описание основных классов, используемых в классе teleVINChannel

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
vinTexturesCacher	texturesCacher	Отвечает за оперативную загрузку текстур земной поверхности из файловой системы (подкачка текстур)
vinEarthUpdater	earthUpdater	Отвечает за визуализацию нескольких уровней земной поверхности (начиная с уровня №5), наблюдаемых в основном канале (иммитатор иллюминатора)
vinEarthUpdater	cameraUpdater	Отвечает за визуализацию нескольких уровней земной поверхности (начиная с уровня №5), наблюдаемых в дополнительном канале
vinSurfaceEffectsUpdater	surfaceEffectsUpdater	Отвечает за визуализацию поверхностных эффектов, в частности облаков (общая облачность и облачность на интервалах)
vinFullEarth	fullEarth	Отвечает за визуализацию одного уровня земной поверхности (номер уровня 4)
vinBackgroundUpdater	backgroundUpdater	Отвечает за формирование положения и ориентации следующих объектов при их визуализацию: звездного неба, лимба, земной атмосферы.

3 Класс vinTexturesCacher

Класс vinTexturesCacher отвечает за оперативную загрузку текстур земной поверхности из файловой системы (подкачка текстур).

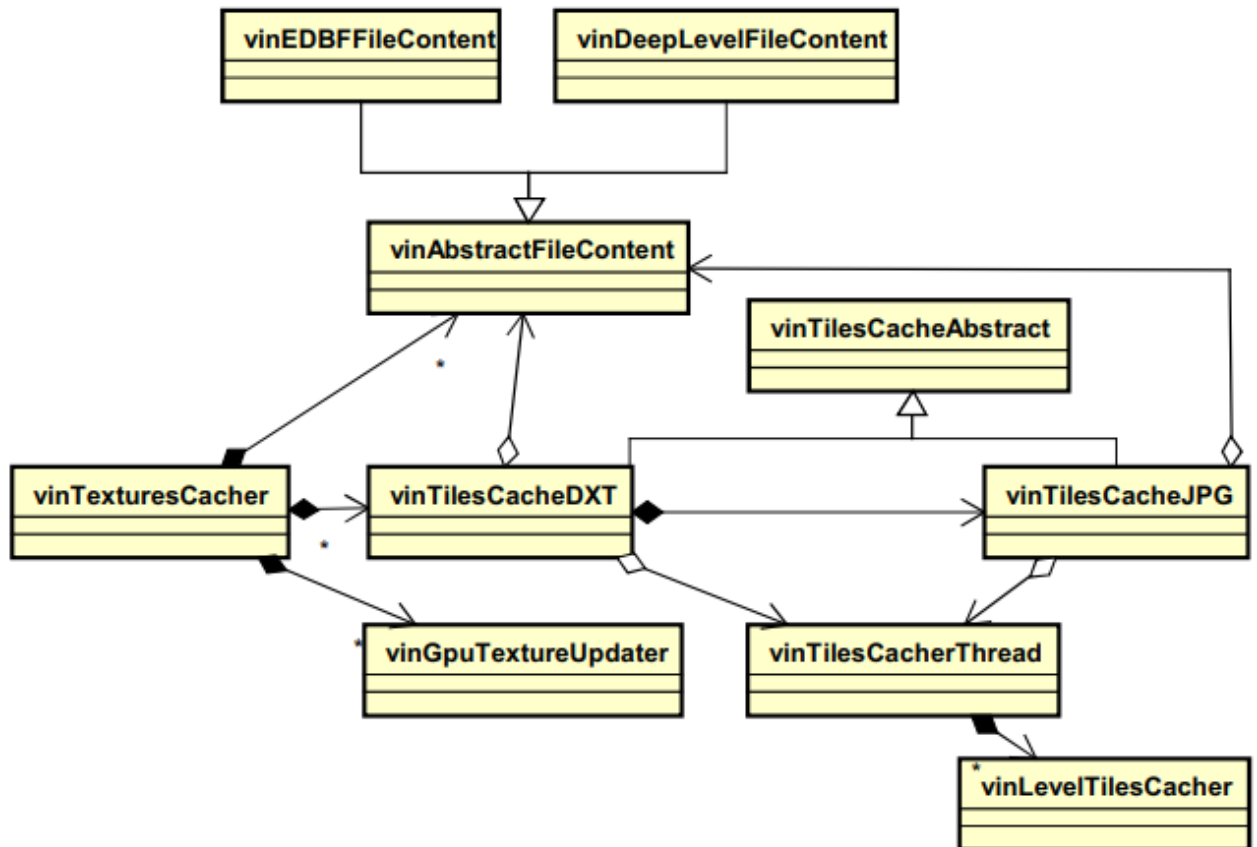


Рисунок А.3 - Класс vinTexturesCacher и связанные с ним классы (диаграмма классов)

Класс vinTexturesCacher представляет собой композитный класс, который содержит указатели на экземпляры других классов (фрагмент исходного кода файла sources\VIN\Updaters\vinTexturesCacher.h):

```

class vinTexturesCacher final : public vwiSystemThread {
    // фрагмент кода опущен
    vinAbstractFileContent ** contents;
    vinTilesCacheDXT** mips;           // Contain a texture in CPU
memory (one texture for one Earth layer)

```

```

    vinGpuTextureUpdater**      pGpuTextureUpdaters; // Copy a texture from
CPU to GPU memory (one updater for one Earth layer)

    vin::threading::AtomicNumber flag;

    vwiCriticalSection criticalSection;

    vinDebugBuffersManager * debugBuffers;

    vinTilesCacherThread * tilesCacherThread;

    // фрагмент кода опущен
};

```

Таблица А.2 – Описание основных классов, используемых в классе vinTexturesCacher:

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
vinAbstractFileContent	contents	Является базовым классом в иерархии, отвечает за предоставление интерфейса для расчёта физических адресов ячеек на жестком диске для загрузки заданных тайлов (из файла с заданным номером уровня). Один экземпляр данного класса отвечает за один файл с уровнем.
vinEDBFFileContent	contents	Отвечает за расчёт физических адресов на жестком диске для загрузки заданных тайлов (из файлов с уровнями с 5 по 13). Один экземпляр данного класса отвечает за один файл с уровнем.
vinDeepLevelFileContent	contents	Отвечает за расчёт физических адресов на жестком диске для загрузки заданных тайлов (из файлов с уровнями от 14 и больше). Один экземпляр данного

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
		класса отвечает за один файл с уровнем.
vinTilesCacheDXT	mips	Хранит набор указателей на все загруженные с жесткого диска тайлы одного уровня в формате DXT в системной оперативной памяти (оперативная память в области видимости процессора). Один экземпляр данного класса отвечает за один файл с уровнем.
vinTilesCacheJPG	jpgDataCache	Хранит набор указателей на все загруженные с жесткого диска тайлы одного уровня в формате JPEG в системной оперативной памяти (оперативная память в области видимости процессора). Один экземпляр данного класса отвечает за один файл с уровнем.
vinTilesCacherThread	tilesCacherThread	Осуществляет перенаправление вызовов из экземпляров классов vinTilesCacheDXT и vinTilesCacheJPG в экземпляры классов vinLevelTilesCacher.
vinLevelTilesCacher	cachers	Отвечает за последовательность операций: загрузка по указателю данных с жесткого диска об одном тайле, ковертация данных тайла из формата JPEG в формат ARGB, затем конвертация из формата ARGB в формат DXT, сохранение результата в массив. Кроме того, возвращает по

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
		требованию указатель на тайл в формате DXT. Хранит набор указателей на все загруженные с жесткого диска тайлы одного уровня в формате DXT в системной оперативной памяти (оперативная память в области видимости процессора).
vinGpuTextureUpdater	pGpuTextureUpdaters	Отвечает за копирование текстуры одного уровня в формате DXT из системной оперативной памяти в оперативную память видеокарты (видео-память). Один экземпляр данного класса отвечает за один файл с уровнем.

В экземпляре класса `vinTexturesCacher` осуществляется создание экземпляров классов `vinTilesCacherThread`, `vinEDBFFileContent`, `vinDeepLevelFileContent`, `vinTilesCacheDXT`, `vinGpuTextureUpdater` (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\Updaters\vinTexturesCacher.cpp`):

```
vinTexturesCacher::vinTexturesCacher(const size_t _piecesNum, const
mapsTypeEnum mapsType, vinLevelsTexture const * const levels) :
vwiSystemThread("VinDecompression") {
    // фрагмент кода опущен
    tilesCacherThread = new vinTilesCacherThread(levels->
getPOIMaxMemorySize());
    for (size_t i = 1; i < levelsNum; ++i) {
        if (levels->checkPresenceLevel(i)) {
            if (i <= maximumTotalLevel) {
                char const * fileName[MAPS_TYPES_NUM];
```

```

        for (size_t j = 0; j < MAPS_TYPES_NUM; ++j) {
            fileName[j] = levels->getEarthLevels((mapsTypeEnum)j)->getPathToLevel(i);
        }
        contents[i] = new vinEDBFFileContent(mapsType,
tilesCacherThread, fileName, i);
    } else {
        contents[i] = new vinDeepLevelFileContent(mapsType,
tilesCacherThread, i);
    }
}

// фрагмент кода опущен
for (size_t i = 1; i < levelsNum; ++i) {
    if (levels->checkPresenceLevel(i)) {
        mips[i] = new vinTilesCacheDXT(_piecesNum,
contents[i], debugBuffers, CACHE_SIZE_X, CACHE_SIZE_Y,
tilesCacherThread);
        mips[i + levelsNum] = new vinTilesCacheDXT(_piecesNum,
contents[i], debugBuffers, CACHE_SIZE_X, CACHE_SIZE_Y,
tilesCacherThread);
        tJPGContent::tContentHeader const* const header = contents[i]->GetHeader();
        const vin::Vector2<size_t> tileSize(header->cellSizeX, header->cellSizeY);
        pGpuTextureUpdaters[i] = new
vinGpuTextureUpdater(textureSize, tileSize, vin::texturesFormat);
        pGpuTextureUpdaters[i + levelsNum] = new
vinGpuTextureUpdater(textureSize, tileSize, vin::texturesFormat);
    }
}

```



```

    }
    Create(tpc_NORMAL, false);
}

```

В экземпляре класса `vinTilesCacheDXT` осуществляется создание одного экземпляра класса `vinTilesCacheJPG` (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\vinTilesCacheDXT.cpp`):

```

vinTilesCacheDXT::vinTilesCacheDXT(const size_t _piecesNum,
vinAbstractFileContent const * const _content, vinDebugBuffersManager const *
const _debugBuffers, const int _cacheWindowX, const int _cacheWindowY,
vinTilesCacherThread const * const _tilesCacherThread) :
    vinTilesCacheAbstract(_piecesNum, _cacheWindowX, _cacheWindowY,
jpeg2dxt::getArrayOfPixelArrayWithMipMaps(_content->GetHeader()->cellSizeX,
_content->GetHeader()->cellSizeY, vin::MIPMAPS_NUM, vin::texturesFormat),
_content->GetResX(), _content->GetResY()),
    content(_content), debugBuffers(_debugBuffers),
tilesCacherThread(_tilesCacherThread) {
    jpgDataCache = nullptr;
    schedule.reserve(getCacheCount());
    cellSizeX = content->GetHeader()->cellSizeX;
    cellSizeY = content->GetHeader()->cellSizeY;
    tileSize = cellSizeX * cellSizeY;
    defferedX.setNumber(-1);
    defferedY.setNumber(-1);
    argbBuffer =
(BYTE*)_aligned_malloc(jpeg2dxt::getArrayOfPixelArrayWithMipMaps(cellSizeX,
cellSizeY, vin::MIPMAPS_NUM,
dxtcompress::BufferFormat::ARGB_FORMAT), 16);
    // for rgba content;
    vwiAssert(nullptr != argbBuffer);
}

```

```

        compressorParams.first = TJ_BGR;
        compressorParams.second =
dxtcompress::DxtCompressorFlags::LOW_QUALITY_HIGH_SPEED;
        jpgDataCache = new vinTilesCacheJPG(_piecesNum, content,
cacheWindowX, cacheWindowY, _tilesCacherThread);
    }

```

В экземпляре класса `vinTilesCacherThread` осуществляется создание нескольких экземпляров классов `vinLevelTilesCacher` (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\Updaters\vinTilesCacherThread.cpp`):

```

vinTilesCacherThread::vinTilesCacherThread(const size_t POIMaxMemorySize) :
vwiSystemThread("vinTilesCacherThread"),
updateEvent("vinTilesCacherThreadEvent") {
    for (size_t i = 1; i <= vin::NUMLEVELS; ++i) {
        cachers[i] = new vinLevelTilesCacher(TILESIZE_X, TILESIZE_Y,
JPEG_SIZE);
    }

    // фрагмент кода опущен
}

```

4 Класс vinEarthUpdater

Класс vinEarthUpdater отвечает за визуализацию нескольких уровней земной поверхности (начиная с уровня №5), наблюдаемых в основном канале (иммитатор иллюминатора) или дополнительном (иммитатор фотоаппарата).

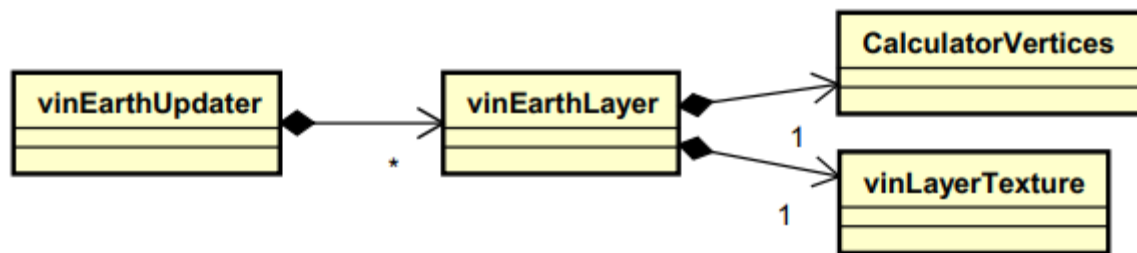


Рисунок 1 - Класс vinEarthUpdater и связанные с ним классы (диаграмма классов)

В экземпляре класса vinEarthUpdater осуществляется создание нескольких экземпляров классов vinEarthLayer (фрагмент исходного кода файла sources\VIN\Updaters\vinEarthUpdater.cpp):

```

vinEarthUpdater::vinEarthUpdater(const size_t _piecesNum,
vinEarthLevelsInformation const * const _levels, vwiNodeSimpleGroup* const
_group, vinTexturesCacher* const _texturesCacher, const size_t _numberOfLayers,
const vin::containersNodeType _type, vwiApplicationViewer const * const
_viewer) :
    abstractUpdater(_viewer, _levels, _numberOfLayers),
texturesCacher(_texturesCacher), type(_type), levels(_levels),
    sunGeoGoords(0.0, 0.0), nadirGeoCoords(0.0, 0.0), specIsLoaded(false),
specIsDisplayed(false) {

    earthLayers = new vinEarthLayer[numberOfLayers];
    for (int i = static_cast<int>(numberOfLayers - 1); i >= 0; --i) {
        const size_t n = static_cast<size_t>(i);
    }
}
  
```

```

        earthLayers[n].vertices = new
CalculatorVertices(EarthSegmentMaterialFactory::getMaterialForSegment(type, n),
SEGMENTS_NUM, _group, levels);

        earthLayers[n].pTexture = new vinLayerTexture(_piecesNum, levels-
>getMaxLevel(), levels->getTextureShift(), vin::Vector2<size_t>(levels-
>getTextureSizeX(), levels->getTextureSizeY()));
    }

    angle = 0.0;

    // фрагмент кода опущен
}

```

В экземпляре класса `vinEarthLayer` осуществляется создание экземпляров классов `CalculatorVertices` и `vinLayerTexture` (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\Updaters\vinEarthUpdater.h`):

```

class vinEarthUpdater final : public abstractUpdater {
    vinTexturesCacher* const texturesCacher;
    vinEarthLevelsInformation const* levels;

    struct vinEarthLayer {
        CalculatorVertices * vertices;
        vinLayerTexture * pTexture; // Texture for one Earth layer (stored in
GPU memory)
    };

    vinEarthLayer * earthLayers;
}

```

```
// фрагмент кода опущен
```

```
};
```

Ниже приведено краткое описание основных классов, используемых в классе `vinEarthUpdater`:

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
<code>vinEarthLayer</code>	<code>earthLayers</code>	Меш (полигональная сетка) + текстура для одного уровня
<code>CalculatorVertices</code>	<code>vertices</code>	Отвечает за создание меша (полигональной сетки) для одного уровня, на который будет наложена текстура уровня.
<code>vinLayerTexture</code>	<code>pTexture</code>	Текстура для одного уровня

1.1.1. Класс `vinFullEarth`

Класс `vinFullEarth` отвечает за визуализацию одного уровня земной поверхности. Экземпляр данного класса может быть использован для уровней с номером от 0 до 4, т.к. все тайлы этих уровней могут быть помещены в системную оперативную память.

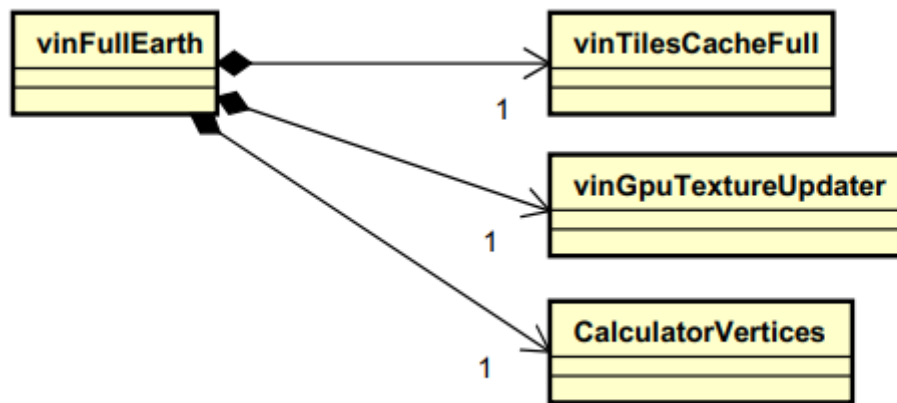


Рисунок 2 - Класс `vinFullEarth` и связанные с ним классы (диаграмма классов)

В экземпляре класса `vinFullEarth` осуществляется загрузка текстуры одного уровня с жёсткого диска, копирование текстуры из системной оперативной памяти (в области видимости процессора) в оперативную память видеокарты, создание меша (полигональной сетки), на который будет наложена текстура уровня (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\Updaters\vinFullEarth.cpp`):

```

void vinFullEarth::Init3D() {
    for (size_t map_type = 0; map_type < MAPS_TYPES_NUM; ++map_type)
    {
        // Load a texture (array of tiles) from HDD to CPU memory
        vinTilesCacheFull * const pCpuTexture = new
        vinTilesCacheFull(fileName[map_type], MERCATOR_LEVEL);
        const vin::Vector2<size_t> & textureSize = pCpuTexture-
        >getTextureSize();
        const vin::Vector2<size_t> & tileSize = pCpuTexture-
        >getTileSize();

        // Create an empty texture in GPU memory
        pGpuTexture[map_type] = nullptr;
        vwiCheck_D3DAPI(VWIGRAPHICINTERNAL->GetD3DDevice()-
        >CreateTexture(static_cast<UINT>(textureSize.x),

```

```

static_cast<UINT>(textureSize.y), vin::MIPMAPS_NUM,
D3DUSAGE_DYNAMIC, (dxtcompress::BufferFormat::DXT1_FORMAT ==
vin::texturesFormat) ? D3DFMT_DXT1 : D3DFMT_DXT5,
D3DPOOL_DEFAULT, &pGpuTexture[map_type], NULL));

    // Copy a texture from CPU memory to GPU memory
    bool result = false;
    vin::Vector2<__int64> topLeftPos(0, 0);
    vinGpuTextureUpdater * const pGpuTextureUpdater = new
    vinGpuTextureUpdater(textureSize, tileSize, vin::texturesFormat);
    pGpuTextureUpdater->copyTexture(topLeftPos, pCpuTexture,
    pGpuTexture[map_type], result);
    vwiAssert(true == result);

    delete pGpuTextureUpdater;
    delete pCpuTexture;
}
}

```

Ниже приведено краткое описание основных классов, используемых в классе teleVINChannel:

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
vinTilesCacheFull	pCpuTexture	Отвечает за загрузку с жесткого диска и хранение в системной оперативной памяти текстуры для одного уровня земной поверхности (текстура содержит изображение всей земной поверхности целиком). Объект данного класса может быть использован для уровней от 0 до

Название класса	Название экземпляра класса (либо указателя или ссылки)	Назначение класса
		4, т.к. все тайлы этих уровней могут быть помещены в системную оперативную память. Текстура земной поверхности представлена набором тайлов.
vinGpuTextureUpdater	pGpuTextureUpdater	Отвечает за копирование текстуры одного уровня в формате DXT из системной оперативной памяти в оперативную память видеокарты (видео-память).
CalculatorVertices	vertices	Отвечает за создание меша (полигональной сетки) для одного уровня, на который будет наложена текстура уровня.

1.1.2. Класс vinSurfaceEffectsUpdater

Класс vinSurfaceEffectsUpdater отвечает за визуализацию поверхностных эффектов, в частности облаков (общая облачность и облачность на интервалах)

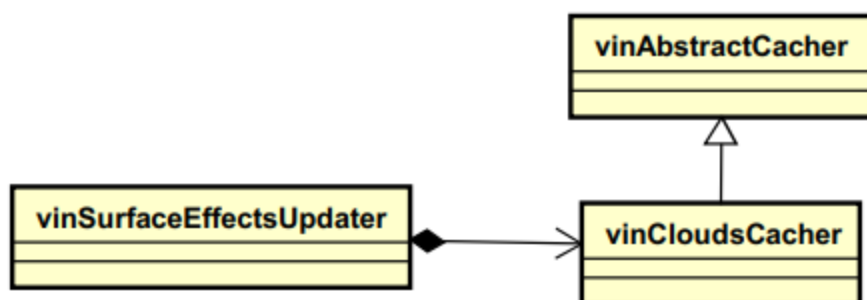


Рисунок 3 - Классы vinSurfaceEffectsUpdater и vinCloudsCacher (диаграмма классов)

В экземпляре класса `vinSurfaceEffectsUpdater` осуществляется передача управления в экземпляр класса `vinCloudsCacher` (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\Clouds\vinSurfaceEffectsUpdater.cpp`):

```
void vinSurfaceEffectsUpdater::Init3D() {
    clouds->Init3D();
}

void vinSurfaceEffectsUpdater::DeInit3D() {
    clouds->DeInit3D();
}

void vinSurfaceEffectsUpdater::createGeometry(const vwiMatrix&
transformationMatrix, const double altitude) {
    clouds->createGeometry(transformationMatrix, altitude -
vin::CLOUDS_HEIGHT);
}

void vinSurfaceEffectsUpdater::setCloudsParameters(const std::shared_ptr<const
AltairMessages::AltairClouds> parameters) {
    clouds->setParameters(parameters);
    setCloudIntervals(parameters);
    location = parameters->cloudstype();
}
```

В экземпляре класса `vinCloudsCacher`, который является наследником класса `vinAbstractCacher`, осуществляется использование методов базового (родительского) класса для загрузки текстуры облачности с жёсткого диска, копирование текстуры из системной оперативной памяти (в области видимости процессора) в оперативную память видеокарты, создание меша (полигональной

сетки), на который будет наложена текстура уровня (фрагмент исходного кода файла sources\VIN\Clouds\vinAbstractCacher.cpp):

```
void vinAbstractCacher::updateTexture(LPDIRECT3DTEXTURE9&
_pGpuTexture) {
    const vin::Vector2<size_t> textureSize(levels->getTextureSizeX(), levels-
>getTextureSizeY());
    const vin::Vector2<size_t> tileSize(TILE_SIZE, TILE_SIZE);
    vinGpuTextureUpdater gpuTextureUpdater(textureSize, tileSize,
dxtcompress::BufferFormat::DXT5_FORMAT);

    bool result = false;
    vin::Vector2<__int64> topLeftPos(0, 0);
    gpuTextureUpdater.copyTexture(topLeftPos, pTextureLoader.get(),
_pGpuTexture, result);
    vinAssertMsg(result, "[vinAbstractCacher]: Error while updating texture.");
}

void vinAbstractCacher::createVertices(vwiNodeSimpleGroup* const group,
vwiResourceRef* material, const unsigned segmentsNum) {
    vertices = std::make_unique<CalculatorCloudsVertices>(material,
segmentsNum, group, levels.get());
}
```

1.1.3. Класс vinBackgroundUpdater

Класс vinBackgroundUpdater отвечает за формирование положения и ориентации следующих объектов при их визуализацию: звездного неба, лимба, земной атмосферы.

В экземпляре класса `vinBackgroundUpdater` осуществляется управление матрицами, отвечающими за положение, поворот и масштаб соответствующих объектов (фрагмент исходного кода файла `sources\VIN\Updaters\vinFullEarth.cpp`):

```
vinBackgroundUpdater::vinBackgroundUpdater() {
    starsNode = loadNode(nodesNames::starsSpace, starsMatrix);
    limbNode = loadNode(nodesNames::limbSpace, limbMatrix);
    atmoNode = loadNode(nodesNames::atmoSpace, atmoMatrix);
    antennaProgressNode = loadNode(nodesNames::antennaProgressSpace,
antennaProgressMatrix);
    antennaSoyuzNode = loadNode(nodesNames::antennaSoyuzSpace,
antennaSoyuzMatrix);
}
void vinBackgroundUpdater::updateBackground(const vwiMatrix&
starsConversion, const double orbitAltitude) {
    starsNode->Replace(starsMatrix * starsConversion,
vwiEngine::tsm_LocateInBasis);

    limbMatrix.v[3].z = START_SATELLITE_HEIGHT - orbitAltitude;
    limbNode->Replace(limbMatrix, vwiEngine::tsm_LocateInBasis);

    atmoMatrix.v[3].z = START_SATELLITE_HEIGHT - orbitAltitude;
    atmoNode->Replace(atmoMatrix, vwiEngine::tsm_LocateInBasis);
    antennaProgressNode->Replace(RotZMatr(2.0 * vwiEngine::vwiPI *
VWIAPPLICATION->GetAbsoluteTime() * 0.001) * antennaProgressMatrix,
vwiEngine::tsm_LocateInBasis);
    antennaSoyuzNode->Replace(RotZMatr(2.0 * vwiEngine::vwiPI *
VWIAPPLICATION->GetAbsoluteTime() * 0.001) * antennaSoyuzMatrix,
vwiEngine::tsm_LocateInBasis);
}
```

Приложение Б Оценка качества имитатора УРМ ВИН

Таблица Б.1 – Данные для расчета коэффициента функциональной
полноты

№ п/п	Декомпозиция процесса ВИН на решаемые задачи	Тренажеры ВИН 1-го поколения на основе географических карт	Тренажеры ВИН 2-го поколения на основе цифровой модели	Тренажеры ВИН 3-го поколения на основе виртуальной реальности
1	изучение района расположения объекта и планирование сеанса ВИН	+	+	+
2	выбор режима и параметров съемки	+	+	+
3	подготовка средств ВИН	+	+	+
4	обнаружение географических ориентиров	—	+	+
5	обнаружение объектов-реперов	—	+	+
6	обнаружение объекта	—	+	+
7	наведение и захват объекта на сопровождение	—	+	+
8	синхронизация движения линии визирования	—	+	+
9	переход на режим детального наблюдения	—	+	+
10	распознавание объекта	—	+	+
11	компоновка кадра	—	+	+
12	фокусировка объектива	—	+	+
13	экспозамер в «тнях» и «светах»	—	+	+
14	прецизионное наведение	—	+	+

Таблица Б.1 (продолжение)

15	фотосъемка в режиме брекетинга	—	+	+
16	пересылка цифровых снимков в ПК	—	+	+
17	оперативная компьютерная обработка снимков	—	—	+
18	экспресс-доклад по радиоканалу	+	+	+
19	формирование сокращенного пакета данных	—	—	—
20	формирование и сброс по каналу связи основного пакета данных	—	—	—
$K_{\text{фп}}$		0,2	0,85	0,9

Таблица Б.2 – Данные для расчета коэффициента методической полноты

№ п/п	Методические принципы	Тренажеры ВИН 1-го поколения на основе географических карт	Тренажеры ВИН 2-го поколения на основе цифровой модели	Тренажеры ВИН 3-го поколения на основе виртуальной реальности
1	ранжирование навыков по значимости и сложности	+	+	+
2	учет индивидуальных психофизиологических особенностей обучаемого человека-оператора	+	+	+
3	ранжирование упражнений по принципу дозированного наращивания сложности с прерыванием тренировки для оперативного разбора ошибок	+	+	+

4	повторное воспроизведение элементов управления тренажерным средством	+	+	+
5	варьирование обучения в реальном и трансформированном масштабах времени	—	+	+
6	обратная автоматизированная связь с индикацией (сигнализацией) ошибок обучаемого в реальном масштабе времени	—	—	+
7	самоконтроль действий обучаемого космонавта	+	+	+
8	регистрация деятельности оператора и функционирования управляемой системы	—	+	+
9	разбор ошибок обучаемого после тренировки с воспроизведением процесса тренировки в регулируемом масштабе времени	—	—	+
10	объективизация оценки качества выполнения тренировки (автоматическая оценка обученности оператора)	—	—	—
11	архивация данных тренировки	—	+	+
$K_{мп}$		0,45	0,73	0,91

Таблица Б.3 – Данные для расчета коэффициента параметрической адекватности

№ п/п	Параметры операций выполнения ВИН	Тренажеры ВИН 1-го поколения на основе географических карт	Тренажеры ВИН 2-го поколения на основе цифровой модели	Тренажеры ВИН 3-го поколения на основе виртуальной реальности
1	высота полета	—	+	+
2	радиус зоны обнаружения	+	+	+
3	радиус зоны фотографирования	+	+	+
4	линейное разрешение глаза на местности	—	—	+
5	разрешение фотоаппарата на местности	—	—	+
6	площадь кадра на местности	+	+	+
7	диаметр иллюминатора	—	+	+
8	угловая скорость линии визирования	—	+	+
9	располагаемое время на обнаружение	—	+	+
10	располагаемое время на фотосъемку	—	+	+
11	наблюдаемая угловая скорость движения изображения в окуляре и на экране монитора	—	+	+
12	скорость летательного аппарата	—	+	+
13	контрастность объекта	—	—	+
14	яркость подстилающей поверхности и диапазон ее изменения	—	—	—
15	имитации облаков и теней от них	—	+	+
16	имитация изменений времен года	—	+	+
17	имитация невесомости	—	—	—
$K_{ад}$		0,18	0,71	0,88

