

УДК 004,9:528:523.34

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ  
ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ  
ДЛЯ ОТРАБОТКИ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ ЗАДАЧ  
НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ**

Е.С. Юрченко, В.И. Васильев

Е.С. Юрченко; В.И. Васильев  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В свете перспектив развития пилотируемой космонавтики в настоящей статье рассматриваются особенности построения технических средств подготовки космонавтов (ТСПК) с применением технологий виртуальной реальности для обеспечения подготовки космонавтов к выполнению задач на поверхности Луны. Учитывается опыт создания и применения ТСПК при подготовке к профессиональной деятельности космонавтов в условиях орбитального полета ПКА и опыт подготовки специалистов по задачам геологической разведки, имеющийся в высших учебных заведениях и институтах Российской академии наук.

**Ключевые слова:** визуальное информационное пространство, Луна, виртуальная реальность, геологическая разведка, обучение

**Conceptual Foundations of Building Simulators Using Virtual Reality Technologies for Practicing Exploratory Operations on the Lunar Surface. E.S. Yurchenko, V.I. Vasiliev**

In the light of the development lines of manned space exploration, the paper considers the features of building the Cosmonaut Training Technical Facilities (CTTFs) with the use of virtual reality technologies to ensure cosmonaut training for activity on the lunar surface. The experience in creating and using CTTFs to train cosmonauts for professional activity under orbital flight conditions as well as the experience in training specialists for geological exploration tasks existing in institutions of higher education and establishments of the Russian Academy of Sciences are taken into account.

**Keywords:** visual information space, Moon, virtual reality, geological exploration, training

**Поисково-разведочные задачи ресурсного освоения Луны**

Освоение Луны предполагает решение таких задач как добыча лунных ресурсов и в первую очередь редкоземельных металлов. Другой важной задачей является добыча водяного льда и получение из него воды, водорода и кислорода, а также разработка и использование полезных ископаемых планеты для изготовления (получения) строительных материалов [1, 5, 6]. Переход

к практическому использованию природных ресурсов Луны потребует приоритетное проведение поисково-разведочных мероприятий.

Очевидно, начальные стадии освоения Луны должны состоять из проведения мониторинга окружающей среды и геологической разведки полезных ископаемых с последующим картографированием мест нахождения.

Согласно существующей нормативной базе, мониторинг природной среды (применительно к Луне) может включать в себя напланетные исследования геологического строения полигона, реголита, ландшафтов, физического воздействия природного характера, радиационной обстановки. Последующая камеральная обработка должна базироваться на создании и ведении информационной фактографической и картографической базы данных, включающей в себя весь набор ретроспективной, напланетной и лабораторной информации как по каждому компоненту природной среды отдельно, так и комплексных данных, характеризующих состояние территории [7].

Такую базу данных целесообразно вести в едином геоинформационном пространстве, которое позволит не только подготовить картографический материал, но и проводить синтез имеющихся многокомпонентных данных окружающей среды. Существующие геоинформационные системы (ГИС) позволяют в режиме реального времени уточнять, корректировать и актуализировать данные о текущем состоянии окружающей природной среды территории исследования и комплексировать различные виды информации.

Решение задачи картографирования полигона посадки целесообразно начинать с создания базового ГИС-проекта, содержащего топографическую основу полигона. При создании топографической основы важным шагом является выбор уровня генерализации и масштаба. Масштаб топографической основы должен соответствовать поставленным задачам. А также должно быть реализовано навигационное обеспечение геологической разведки полигона [11]. В дальнейшем должно происходить наполнение ГИС информацией, получаемой в ходе выполнения поисково-разведочных исследований, включающих:

- локализацию точек измерения компонентов природной среды;
- местоположение активных экзогенных процессов;
- данные о геоморфологии и ландшафтах;
- результаты исследований опробованного материала в форме атрибутивной информации к каждой точке опробования и пр.

Выполнение поисково-разведочных исследований территории лунного полигона посадки может быть представлено следующим составом полетных операций (рис. 1).

Таким образом, космонавт должен быть обучен использованию инструментов измерения и регистрации параметров окружающей среды, работе с информационными системами, обработке и формализации данных на топографической основе полигона посадки, закреплению на местности результатов селенодезических измерений и пунктов опорной координатной сети.

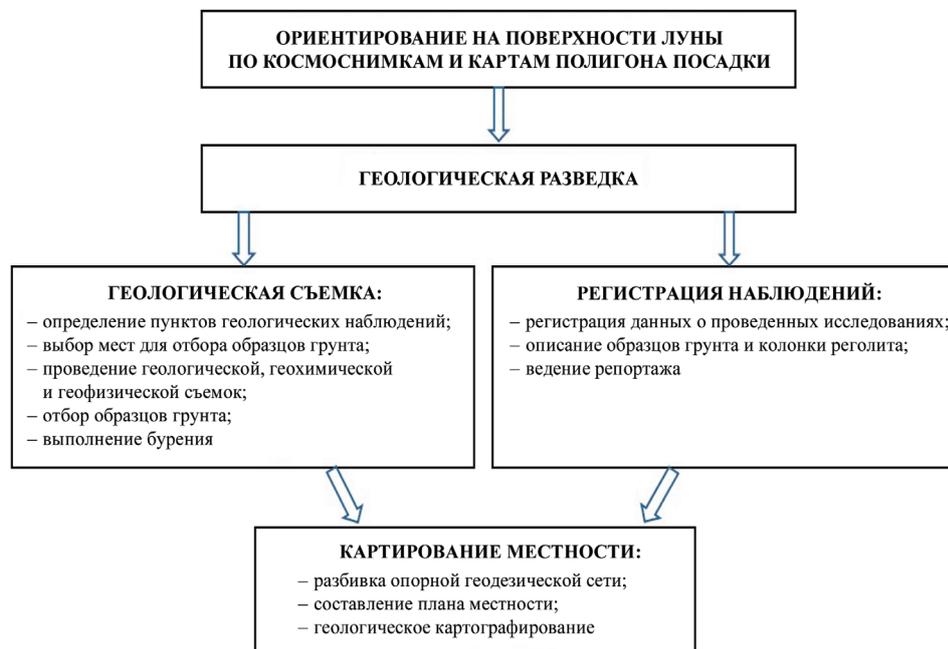


Рис. 1. Ориентировочный состав полетных операций при выполнении поисково-разведочных исследований территории лунного полигона

## Принципы подхода к организации подготовки космонавтов

Исходя из изложенного выше, для обучения космонавтов целесообразно применить следующий порядок организации подготовки:

1. Теоретическое изучение приборов геологической, геохимической и геофизической съемок, адаптированных к работе на Луне, с практической отработкой навыков их эксплуатации в лабораторных условиях.

2. Изучение ГИС-технологий и практические занятия по корректировке топографической основы измеренными учебными данными.

3. Практическое обучение применению приборов геологической, геохимической и геофизической съемок с последующей обработкой данных и внесению их в ГИС-основу.

4. Практическое обучение в условиях виртуального информационного пространства (ВИП) с использованием цифровой визуальной модели (ЦВМ) полигона посадки и применением имитаторов приборов геологической, геохимической и геофизической съемок и персонального компьютера (ПК) в виде планшета с установленными ГИС-программой и специализированным программным обеспечением (СПО).

Для организации подготовки космонавтов в части геологической разведки, применения приборов геологической, геохимической, геофизической съемок и ГИС-программ целесообразно использовать имеющийся опыт подготовки студентов и специалистов геологических специальностей в лабораторных условиях и в условиях проведения практических поисковых работ на полигонах геологического факультета Московского государственного университета (МГУ), Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) и других учебных заведений и институтов РАН.

Так, например, для общей подготовки по геологической разведке можно использовать Крымский учебно-научный центр МГУ, расположенный в зоне горного Крыма, где имеется большое разнообразие геологических структур, которые являются наглядным учебным материалом для практического освоения методов геологоразведки. Также этот центр имеет значительную коллекцию пород и минералов геологических структур Крыма для использования при сравнительном анализе пород в процессе обучения.

В то же время ИГЕМ РАН предлагает проводить обучение космонавтов основам выявления, прогноза, изучения и анализа преимущественно рудных геологических объектов (месторождений, рудопроявлений) разных типов полезных ископаемых на территории Восточно-Сибирской экспедиционной базы ИГЕМ РАН в Читинском районе Забайкалья. Чрезвычайная насыщенность территории юго-восточного Забайкалья разнообразными рудными объектами, достаточно сложное геологическое строение, доступность их визуального изучения в обнажениях (выходах горных пород на дневную поверхность), холмистый степной ландшафт – все это позволяет рекомендовать данный район в качестве учебного полигона для подготовки космонавтов в части геологической разведки в районе посадки на лунной поверхности.

Условия выполнения задач на поверхности Луны в районе южного полюса существенно отличаются от условий выполнения задач на учебных полигонах геологической подготовки по своим физическим характеристикам: по типам грунтов; по ландшафтам; по характеру освещенности (низкое Солнце, резкие тени, блики от рассеяния света на поверхности реголита) и др. В связи с этим целесообразно после обучения геологической разведке в условиях наземных полигонов применить для отработки отдельных напланетных операций тренажеры с цифровой моделью визуального информационного пространства (ВИП) полигона посадки и с использованием имитаторов научной аппаратуры (НА) для проведения геологической, геохимической и геофизической съемок.

На рис. 2 представлены полетные операции для выполнения задач геологической разведки Луны, навыки и умения проведения которых могут быть отработаны космонавтами на тренажерах с применением технологий виртуальной реальности (VR).

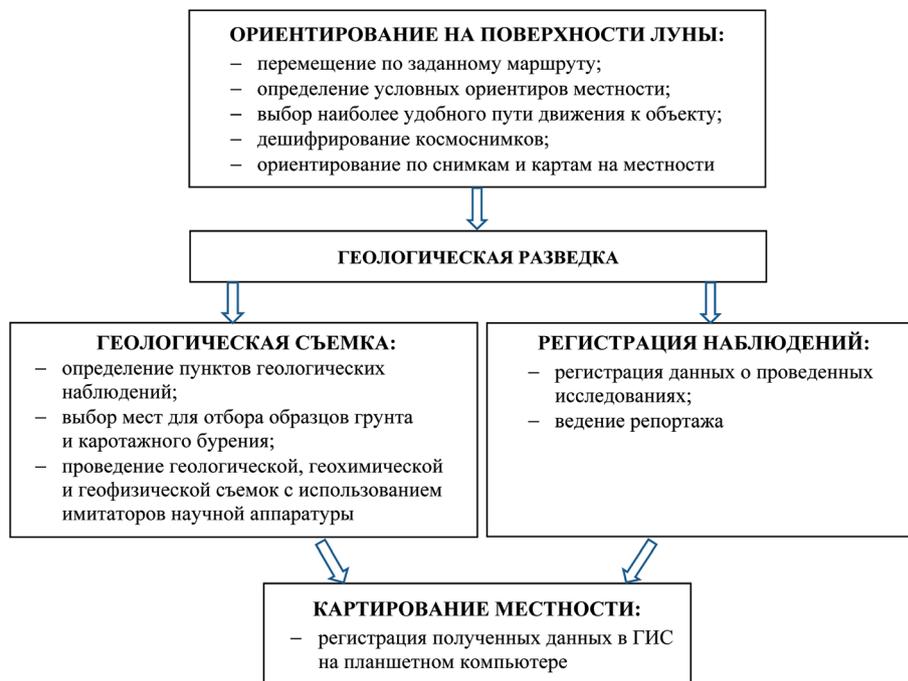


Рис. 2. Структура полетных операций для отработки на тренажере VR

## Анализ возможностей систем формирующих ВИП

Имеющийся в ЦПК опыт создания и применения ТСПК ориентирован на обеспечение подготовки космонавтов к выполнению задач в условиях орбитального полета при учете воздействия невесомости. Обеспечение подготовки космонавтов к выполнению задач на поверхности Луны отличается, во-первых, по специфике задач, связанных с картированием полигона посадки, проведением геологической разведки, разворачиванием регистрирующей научной аппаратуры, выполнением внешнего осмотра технических средств и т. д. Во-вторых, по физическим условиям, связанным с наличием гравитации в 6 раз меньшей, чем на Земле, низким углом Солнца над горизонтом, характерным для полигонов, выбранных в районе южного полюса, объективно ухудшающих условия ориентирования. Отсутствие атмосферы исключает рассеяние светового потока, что создает резкие границы объектов, когда подсветка в тени возможна только за счет отраженного света от окружающих объектов, расположенных на возвышенностях.

Для подготовки космонавтов может быть предложено два варианта построения тренажера с применением технологий VR:

1. Визуализация ВИП экранной системой отображения посредством проецирования изображения проекторами на отражающий экран.
2. Отображение ВИП через мониторы очков VR.

Для формирования адекватного восприятия визуализируемого на тренажере ВИП необходимо создать соответствие отображаемого визуального пространства зрительной системе человека.

Для этого необходимо:

- а) обеспечить разрешение изображения в ВИП на уровне разрешающей способности зрительной системы человека, равной одной угловой минуте;
- б) исключить (минимизировать) эффект воздействия на оператора задержки формирования изображения ВИП при изменении положения тела оператора;
- в) исключить (минимизировать) влияние ВИП на аккомодацию мышц хрусталика глаза;
- г) обеспечить эффект присутствия.

Рассмотрим технические возможности формирования адекватных человеческому зрению ВИП как с применением очков ВР, так и с помощью проекционного экрана.

Как указано выше, для сравнительной оценки в качестве эталона зрительной системы человека примем угловую разрешающую способность зрительной системы человека при нормальном зрении и оптимальных условиях освещенности равной  $1' = \frac{1^\circ}{60}$ . Это соответствует 60 пикселям в  $1^\circ$  угла обзора.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены имеющиеся на рынке средства отображения информации: очки ВР 4К (Pimax 4k VR [8]), 8К (Pimax 8k VR [9]) и проекционный сферический экран с углом обзора  $240^\circ$  (рис. 3). Области обзора представленных очков ВР ограничены бинокулярным углом зрения от  $110^\circ$  до  $200^\circ$  и разрешением экрана на один глаз. Чем выше разрешение, тем выше четкость и реалистичнее контент.

В системе формирования изображения на основе проекционных экранов необходимое разрешение, адекватное зрению человека, достигается количеством проекторов (рис. 3).

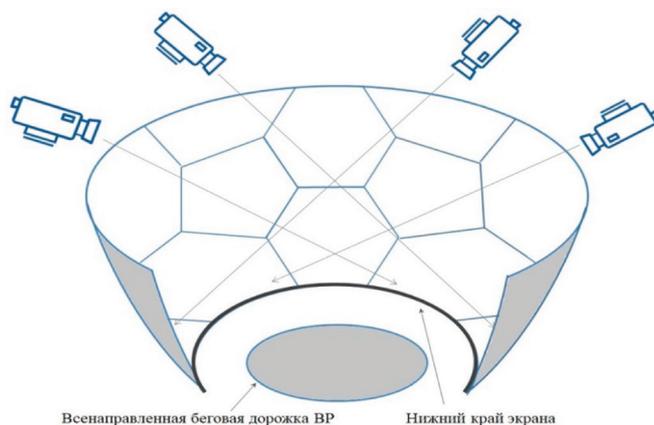


Рис. 3. Схема размещения проекторов для формирования изображения на панорамном проекционном сферическом экране

Результаты сравнительного анализа пространственных разрешений, формируемого ВИП очками ВР 4К, 8К с показателями проекционного экрана в 60 пикселей на градус представлены в табл.

Средство отображения информации	Разрешение экранов, (пиксели)	Угол обзора, (градусы)	Пикселей в одном градусе, (пиксели)	Отклонение от нормы в 60 пикселей на градус
Очки ВР 8К	3840 × 2160 пикселей на один глаз	200	19,2	в 3,1 раза
Очки ВР 4К	1920 × 2160 пикселей на один глаз	110	17,5	в 3,4 раза

Для расчетов введем обозначения:  $\sigma$  – количество пикселей в одном градусе,  $N_{px}$  угол обзора,  $\gamma$  – количество пикселей по ширине экрана.

Тогда количество пикселей в одном градусе вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{N_{px}}{\gamma}. \quad (1)$$

Система формирования изображения на основе проекционных экранов имеет разрешение, адекватное зрению человека, в 60 пикселей. Из формулы (1) находим количество пикселей в одном градусе для очков ВР. В результате очки ВР значительно уступают по разрешению проекционному сферическому экрану (в 3,1–3,4 раза).

Кроме того, при выборе средства отображения информации следует учесть тот факт, что исследования о влиянии очков ВР на зрение или ориентацию в пространстве и вестибулярный аппарат человека не проводились, поэтому нельзя с уверенностью судить о безопасности их использования на этапах подготовки космонавтов.

Как указано в источнике [10], одним из последствий длительного использования очков ВР может являться состояние укачивания. Основной причиной этого являются микрозакладки в изменении изображения в ответ на действия оператора. И если на расстоянии нескольких десятков сантиметров от монитора ПК это не так заметно, поскольку оператора «ориентирует» периферическое зрение, то в случае с очками ВР, чьи дисплеи перекрывают все поле зрения, восприятие существенно меняется.

На проекционном же экране изображение формируется стабильным и практически не зависит от положения тела оператора.

**Влияние ВИП на аккомодацию мышц хрусталика глаза.** В случае с очками ВР, когда мы смотрим на виртуальный горизонт, то мозг ожидает, что мышцы хрусталика и глазного яблока будут работать соответствующим образом. Но физически мы смотрим на объект, находящийся в нескольких сантиметрах перед глазами. В жизни мы воспринимаем все окружающее пространство резким только потому, что в наших глазах имеется «автофокус» – точка сведения глаз и положение хрусталиков постоянно меняются. А дисплеи очков показывают в изображении резким только то, что задумано

разработчиками. И более далекие или ближние предметы могут оставаться размытыми. Это тоже доставляет определенный дискомфорт [10].

Проекционный сферический экран предлагается располагать от оператора на расстоянии от 2 метров и более. В связи с этим глаза настраиваются на бесконечность, а перенастройка зрения на близкое расстояние происходит только в случае работы оператора с каким-либо прибором наблюдения и регистрации, находящимся в его руках, что соответствует логике работы человека в обычных условиях применения регистрирующей аппаратуры (фотоаппаратура, лазерные измерители дальности, приборы геологической разведки, планшетный ПК и т. п.). Кроме того, такое расстояние от экрана обеспечивает возможность применения штатной НА, либо иной НА, с установленными адаптерами на каналы наведения и регистрации для обеспечения ее функционирования по изображению на проекционном экране.

#### **Обеспечение эффекта присутствия средствами формирования ВИП.**

Как известно, эффект присутствия во многом достигается благодаря задействованию периферического (бокового) зрения. Только информация с границ секторов обзора наших глаз позволяет мозгу «видеть» себя именно здесь, «воспринимать» себя в данном месте окружающего пространства. Причем периферическое зрение более чувствительно к движению попадающих в него объектов [10].

Очки VR имеют ограничения поля зрения. И оператор наблюдает только то изображение, которое ему предоставляется через дисплеи очков. Для создания эффекта присутствия необходимо обеспечить угловой обзор изображения ВИП с учетом угла периферического зрения человека, включая возможность поворота головы оператора.

Проекционный сферический экран может обеспечить заданную круговую панораму. В нашей задаче можно ограничиться углом обзора 240°.

Проекционный экран для панорамного отображения с помощью проекторов может быть реализован в виде срезанной, в пределах угла обзора, поверхности полый сферы и иметь вид усеченного икосаэдра [2, 12]. Элементы, из которых состоит усеченный икосаэдр – пятиугольники и шестиугольники, причем каждый пятиугольник со всех сторон окружен шестиугольниками и в каждой из вершин сходятся два шестиугольника и пятиугольник (см. рис. 3). Технология изготовления такого экрана достаточно проста. Сферическая поверхность экрана составляется из частей сферических сегментов (см. рис. 3). Сферические сегменты могут быть изготовлены из стеклопластика. С наружной стороны, вдоль граней сторон, сегменты должны иметь ребра жесткости. Размеры и кривизна сферических сегментов рассчитываются [2]. Сферическую поверхность получают путем составления сферических сегментов ребром к ребру и последующего их крепления. Рабочая поверхность экрана покрывается светоотражающим материалом. Рассмотрим вариант построения тренажера с использованием для создания ВИП рассеивающего сферического экрана в виде усеченного икосаэдра (см. рис. 3).

## Расчет характеристик системы отображения ВИП с применением проекционного сферического экрана

Перемещение в виртуальном пространстве предлагается реализовать с помощью всенаправленной дорожки ВР (рис. 4). При этом предполагается, что оператор будет ориентироваться по ближайшим объектам подстилающей поверхности, находящимся впереди него под углом от 30 градусов и более (рис. 5).



Рис. 4. Пример беговой дорожки ВР

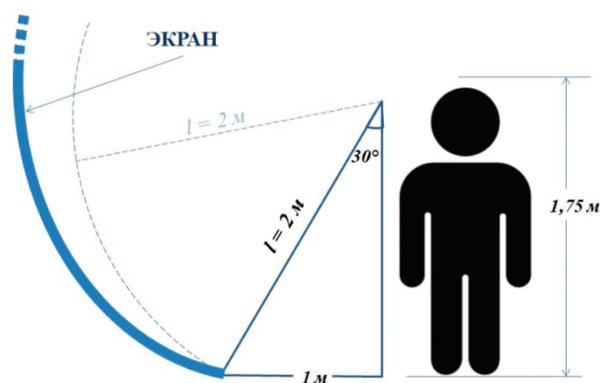


Рис. 5. Схема ориентирования оператора на поверхности

Формируя изображение на экране (см. рис. 5), необходимо учитывать, что требуемое разрешение зависит от удаленности объектов, формирующих сцену ВИП. Исходя из этого, наибольшее разрешение требуется обеспечить при отображении ближайших объектов, находящихся перед наблюдателем, то есть в нижней части экрана.

Рассчитаем оптимальное разрешение, которое необходимо обеспечить в нижней части экрана. Размер участка подстилающей поверхности, отображаемой в нижней части экрана, с высоты 1,75 м под углом  $30^\circ$  и при угле обзора в  $1^\circ$  равен 35 мм (см. рис. 5). В результате вычислений получаем, что с высоты 1,75 м человек под углом  $30^\circ$  различает точку размером около 0,6 мм.

Таким образом, для адекватного восприятия наблюдаемых объектов на поверхности Луны с высоты человеческого роста устройство визуализации изображения подстилающей поверхности должно иметь разрешение не хуже 0,0006 м/пиксел.

Для обеспечения максимального погружения оператора в ВИП необходимо создать условия, когда отображаемое информационное пространство перекрывает поле зрения зрительной системы человека. Учитывая угловые характеристики поля зрения человека (по вертикали вниз  $60^\circ$ , вверх  $55^\circ$ , а по горизонту  $\pm 90^\circ$ ), необходимо обеспечить отображение информации на проекционном экране с обзором по вертикали не менее  $\pm 60^\circ$  и по горизонту  $\pm 120^\circ$  (рис. 6).

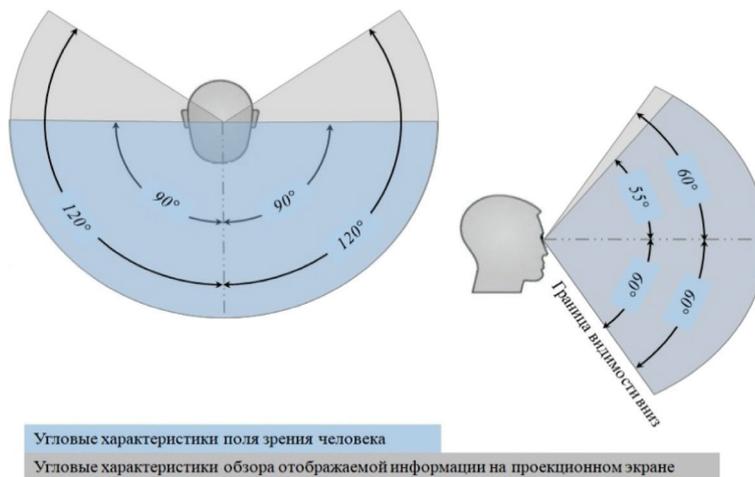


Рис. 6. Угловые характеристики поля зрения человека и изображения на проекционном экране

На рис. 6 представлены угловые характеристики поля зрения человека по горизонту и по вертикали (цвет голубой), а также угловые характеристики обзора отображаемой информации на проекционном экране (цвет серый).

Рассчитаем необходимое количество пикселей по ширине нижней кромки экрана для угла обзора  $240^\circ$  (рис. 7).

Введем обозначения (см. рис. 7):  $r$  – расстояние от ног оператора до нижней части экрана (в метрах);  $\omega$  – ширина нижней части экрана (в метрах);  $\alpha$  – угол обзора по ширине экрана (в градусах);  $\rho$  – плотность тексел (в пиксел/м);  $N_{px}$  – количество пикселей экрана по ширине его нижней кромки.

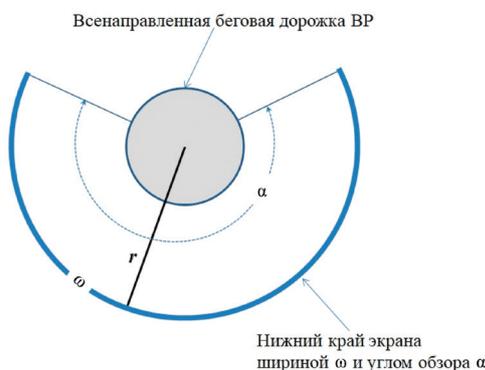


Рис. 7. Положение оператора относительно нижней части экрана

Ширина экрана  $\omega$  – это величина равная длине дуги окружности с центральным углом  $\alpha$  и радиусом  $r$  и вычисляется по формуле (2):

$$\omega = \frac{\pi \cdot r}{180^\circ} \cdot \alpha. \quad (2)$$

Угол обзора по ширине экрана  $\alpha = 240^\circ$ . Расстояние от наблюдателя до нижней части экрана равно 1 м. Таким образом, получаем:  $\omega = 4,19$  м.

Количество пикселей по ширине нижней кромки экрана для наблюдаемой человеком зоны поверхности Луны с высоты своего роста вычисляется по формуле:

$$N_{px} = \rho \cdot \omega. \quad (3)$$

Из формулы (3) найдем количество пикселей по ширине экрана  $N_{px}$ , учитывая известные значения параметров  $\rho = 0,0006$  пиксел/м,  $\omega = 4,19$  м.

Таким образом, количество пикселей по ширине нижней кромки экрана для устройства визуализации изображения подстилающей поверхности должно быть, соответственно, не менее 6983 пикселей.

Анализ современного рынка проекционной аппаратуры показал, что для этих целей можно предложить аналог проектора Epson EH-LS11000W 4K с лазерным источником света и максимальной частотой кадров 120 Гц. Проектор должен обеспечивать одновременное проецирование красного, синего и зеленого цветов. Такое формирование источника света необходимо в силу того, что при применении регистрирующей аппаратуры в виде фотокамеры возможно совпадение срабатывания затвора фотокамеры в момент проецирования того или иного светодиода. В результате на фотоснимке будет запечатлен объект только в красном, синем или зеленом цветах.

Базовые характеристики проектора EH-LS11000W 4K: разрешение –  $3840 \times 2160$ ; рабочий формат – 16:9; диагональ экрана – от 127 см до 762 см; коэффициент проекции – 1,35–2,84.

При выборе проектора необходимо учитывать коэффициент проекции. В нашем случае целесообразно использовать проекторы с коэффициентом проекции более 1,6. Это обеспечит создание проекции необходимого изображения на проекционном экране с расстояния более трех метров.

При этом размещение проекторов должно быть таким, чтобы тело оператора не перекрывало проецирование на экране. Для решения этой задачи необходимо рассчитать наклон и удаление экрана от оператора таким образом, чтобы нижний край экрана был максимально приближен к всенаправленной дорожке ВР, а наклон обеспечивал установку проектора без перекрытия изображения оператором и предметами, находящимися в его руках (планшет, фотокамера, приборы регистрации). Чтобы выполнить эти условия необходимо подобрать количество и расположение проекторов, обеспечивающих нужную трансформацию изображений для сопряжения проекций от нескольких проекторов на проекционном экране (рис. 8).

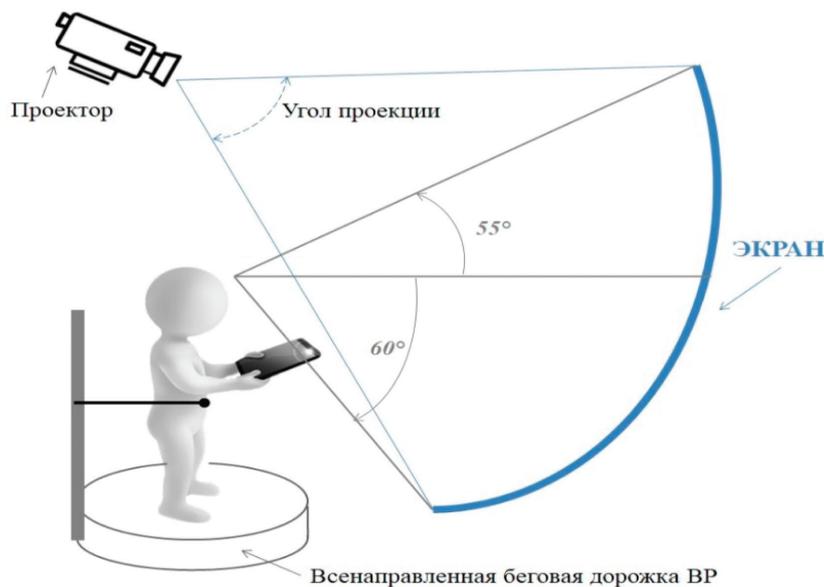


Рис. 8. Совмещение отображаемого ВИП на проекционном экране с полем зрения человека

Для расчета количества проекторов, необходимых для формирования изображения на экране, имеющем длину его нижней части равную 4,19 м (2), целесообразно рассмотреть способ их установки для условий оптимального использования характеристик выбранного проектора. Предлагается конструкция экрана в виде усеченного икосаэдра с расширением в верхней части. Учитывая, что изображение в верхней части экрана отображает объекты, находящиеся в перспективе, то и необходимое разрешение может быть ухудшенным по сравнению с нижней частью экрана. Исходя из этого, проекторы

необходимо установить повернутыми на 90 градусов. То есть меньшую сторону проекции установить горизонтально.

Количество пикселей по меньшей стороне проектора с разрешением 4К равно 2160. Необходимое количество пикселей по нижней кромке экрана – 6983 пиксела. Отсюда вытекает, что будет достаточно четырех проекторов с разрешением 4К, которые в сумме обеспечат 8640 пикселей.

### **Концептуальные основы построения тренажера с применением технологий VR для отработки задач при реализации напланетных миссий**

Космонавт должен иметь возможность выполнять измерения имитаторами геодезических приборов и фотосъемку объектов для их геодезической привязки с последующим прикреплением полученных снимков к опорной карте через ГИС-программу. При наведении имитатора геодезического прибора на проекционный экране ВИП оператор должен наблюдать на экране визуальный маркер. Для вычисления положения маркера на экране необходимо позиционировать имитатор геодезического прибора с целью определения положения линии визирования относительно экрана. Пересечение линии визирования с экраном позволит рассчитать объект ВИП, на который наведен прибор регистрации. Можно использовать другой способ определения положения маркера на экране, который реализуется за счет регистрации отраженного от экрана маркера с использованием видеокамеры технического зрения в инфракрасном диапазоне. Управляя маркером, оператор наводит имитатор на объект, подлежащий регистрации, и делает измерение путем нажатия на кнопку «Регистрация». Вычислительная система тренажера определяет положение объекта в ВИП, на который был наведен маркер, и рассчитывает дальность до него. Далее измеренный параметр оператор закрепляет на опорной карте ГИС планшетного ПК.

Таким образом, тренажер в своем составе должен иметь: систему отображения ВИП с использованием проекционного экрана; всенаправленную дорожку VR, обеспечивающую виртуальное перемещение оператора в ВИП; штатные геодезические и геологоразведочные приборы или их имитаторы; штатный планшетный ПК с установленной ГИС, опорной картой и космическими фотоснимками полигона посадки. На рис. 9 представлена структурная схема такого тренажера.

На схеме тренажера (см. рис. 9) представлено рабочее место оператора (РМО) в составе: проекционного сферического экрана для отображения ВИП, всенаправленной беговой дорожки VR, планшетного ПК, фотокамеры, видеорежиссера, имитаторов геодезических приборов и приборов геологической разведки, специализированное программное обеспечение (СПО) РМО.

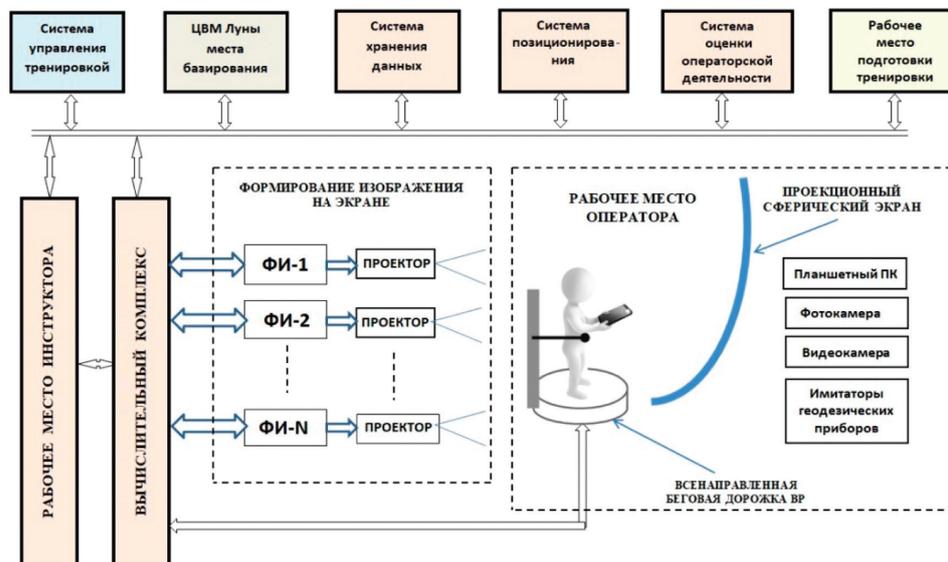


Рис. 9. Структурная схема тренажера для отработки задач мониторинга при реализации напланетных миссий

Рабочее место инструктора (РМИ) должно обеспечивать: задание исходных данных на тренировку; отображение на мониторе плана местности с текущим виртуальным положением на ней оператора; отображение ВИП, наблюдаемое оператором в процессе виртуального перемещения; отображение экрана монитора планшетного ПК оператора; запись работы оператора и наблюдаемой им картины ВИП в формате видеофайла; сохранение результатов проведенного занятия и воспроизведение зарегистрированных действий обучаемого после выполнения тренировок; обработку данных системы оценки операторской деятельности.

Система управления тренировкой (СУТ) должна обеспечивать: задание исходных данных на тренировку с возможностью корректировки параметров; оперативную корректировку положения объектов ВИП сцены тренировки; формирование информации на мониторах РМИ.

Система хранения данных (СХД) должна обеспечивать: хранение вариантов тренировочных упражнений; хранение полученных результатов тренировок; возможность использования накопленных данных при планировании подготовки с учетом индивидуальных результатов обучения операторов.

Формирователи изображения (ФИ) должны обеспечить формирование изображения ВИП для одного из проекторов с учетом сшивки изображения с соседними проекторами и форматирование проектируемого изображения по фигуре проекционного экрана.

Всенаправленная беговая дорожка VR обеспечивает регистрацию многого движения оператора, а СПО ВИП обрабатывает данные и корректирует

отображаемую информацию на средствах отображения, создавая эффект движения оператора в виртуальном пространстве. Дорожка должна иметь возможность изменения наклона для обеспечения имитации ходьбы по уклонам.

Система оценки операторской деятельности (СООД) обеспечивает: регистрацию объективной информации о выполняемых операциях оператора, обработку статистических данных о результатах тренировок, накопление данных о результатах тренировок, формирование оценочных параметров деятельности операторов.

Рабочее место подготовки тренировки (РМПТ) должно обеспечивать: разработку исходных данных на тренировку; формирование сцены ВИП (размещение объектов окружающей среды; определение положения Солнца для создания соответствующей свето-теневого обстановки); формирование задачи тренировки; задание учебного маршрута; подбор нештатных ситуаций; другие исходные данные для конкретных условий планируемой тренировки.

Система позиционирования (СП) должна обеспечивать определение положения и ориентации фотокамеры, а также имитаторов геодезических приборов относительно проекционного экрана и передачу данных в СПО ВИП для идентификации объекта регистрации в ВИП. С целью обеспечения необходимой точности измерения положения линии визирования имитаторов геодезических приборов, систему позиционирования целесообразно реализовывать в оптическом диапазоне частот с применением видеокамер технического зрения.

## **Предложения по формированию ВИП тренажера**

Наиболее сложной задачей, вероятно, будет формирование пространственной модели ВИП. Топографический анализ лунной поверхности, проведенный в работе [3], показывает, что при создании 3D-модели ВИП для ее использования в составе тренажера необходимо учитывать:

- микрорельеф лунной поверхности в месте посадки;
- положение Солнца и Земли над горизонтом в требуемой точке полигона в заданное время работ;
- размеры теней при разных азимутах и углах Солнца;
- видимость рельефа планеты из текущей точки нахождения оператора;
- круговые лунные панорамы, полученные с помощью автоматических КА;
- параметры геологических объектов, имитирующих те или иные проявления характерные задачам геологической разведки на Луне.

При 3D-моделировании полигона посадки обязательному учету подлежат процентное (расчетное) количество и размер объектов микрорельефа. К таким объектам относятся: кратеры, крупные камни, реголит, линейные образования – борозды, уступы и линеаменты (линейные и дугообразные элементы поверхности) неясной формы.

Вся сцена должна состоять из набора указанных объектов, распределенных в свободном порядке и при заданной плотности, основанной на вероятностных оценках их группирования. В системе должна быть реализована возможность перекомпоновки объектов на сцене для создания многообразия условий функционирования оператора в виртуальной среде. Кроме того, в ВИП должны отображаться следы, оставленные идущим оператором и (или) движущимся транспортным средством на поверхности лунного реголита.

Важно отметить возможное влияние на ориентирование оператора малых углов положения Солнца над поверхностью Луны в приполярном районе напланетного базирования. Так, в интересах разработки телевизионной системы для космического аппарата Луна-25 в статье «Служебная телевизионная система КА Луна-25» [4] представлен анализ влияния малых углов Солнца на получение качественного изображения лунной поверхности. Опираясь на этот анализ, можно сделать вывод, что при визуальных наблюдениях на поверхности Луны при движении в сторону солнечного излучения оператор будет видеть в поле зрения участки с максимальной яркостью отражения вследствие характерной индикатрисы рассеяния света на поверхности реголита (рис. 10). Одновременно будут присутствовать сильно затененные участки местности, освещенность которых в условиях отсутствия атмосферы Луны практически отсутствует и формируется лишь за счет переотраженного излучения от других объектов на ее поверхности [4].

Эта особенность хорошо отражена на фрагменте панорамы (см. рис. 10), выполненной с борта китайского лунного ровера Yutu-2 миссии Chang'e 4. Около верхней границы тени от снимающей камеры поверхность кажется очень яркой, хотя ее структура и альбедо, видимо, аналогичны характеристикам участков в соседних частях снимка. В сторонах (слева и справа)



Рис. 10. Фрагмент панорамы, полученной с помощью камеры PCAM ровера Yutu-2 миссии Chang'e 4 (источник: CNSA/CLEP)

от направления на Солнце, изображение имеет хорошо выраженную текстуру и значительно меньшую яркость. При этом в затененных областях снимка информация практически отсутствует [4].

Необходимо отметить, что и при сильной боковой засветке и рассеянии солнечного света на поверхности реголита также могут создаваться трудности в визуальном ориентировании операторов. В связи с этим при формировании ВИП потребуется моделировать прямое излучение Солнца и условия рассеяния света на поверхности реголита.

Для реализации эффекта присутствия оператора на поверхности Луны необходимо осуществлять моделирование динамического изменения сцены ВИП за счет его виртуального перемещения по беговой дорожке VR. В частности, это необходимо выполнить путем создания условий выхода объекта из-за перекрытия другим объектом, изменения размеров объекта, создания ощущения скорости движения космонавта (транспортного средства) за счет перемещения объектов, наблюдаемых оператором периферическим полем зрения и т. д.

## **Выводы**

1. При организации подготовки космонавтов по задачам геологической разведки Луны необходимо найти оптимальное сочетание между теоретической подготовкой в лабораторных условиях, практической подготовкой на учебных полигонах в естественных природных условиях земной поверхности и практической подготовкой на тренажерах VR.

2. Для обеспечения моделирования ВИП лунного полигона посадки на тренажере VR с пространственным разрешением на уровне возможностей зрительной системы человека целесообразно применять программно-технические средства отображения на основе проекционных экранов.

3. Анализ современных аппаратно-программных средств визуализации и опыта их применения в ТСПК при подготовке космонавтов показывает, что при создании ВИП в тренажерах VR решения задач моделирования космической деятельности на поверхности Луны целесообразно разделить на два класса:

– в случае моделирования ВИП для выполнения операций, связанных с ориентированием на поверхности Луны (без моделирования тактильных эффектов взаимодействия с окружающей средой), целесообразно создавать систему компьютерной генерации изображений (СКГИ) на базе средств визуализации с применением проекционных экранов (панорамных или круговых). При применении проекторов уровня 4K технически достижима визуализация с разрешением на уровне возможностей зрения человека. В этом случае частично возможно применение штатной научной аппаратуры или имитаторов НА. Применение шлемов VR в данных задачах нецелесообразно, поскольку при ограниченных углах поля зрения достижимое разрешение их

визуализации в 3–4 раза хуже, чем параметры визуализация на проекционном экране;

– в случае моделирования ВИП для выполнения операций, связанных с моделированием тактильных эффектов взаимодействия с виртуальными объектами ВИП-окружения, возможно и целесообразно создание СКГИ и систем визуализации с применением шлемов VR.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий / Б.И. Крючков, В.М. Усов, В.И. Ярополов, Ю.Б. Сосюрка [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 2(19). – С. 35–57.
- [2] Моцарь, П.И. Анализ применения средств отображения в системах визуализации авиационных тренажеров / П.И. Моцарь, В.П. Зинченко, И.А. Корчин // Системи обробки інформації. – 2006. – № 9(58); ІНПО «АВІА»: Кременчуг, 2ЦНІІ ВВТ ВС України, Київ.
- [3] Картографо-геодезические методы для характеристики посадочных площадок будущих российских миссий Луна-Глоб и Луна-Ресурс / И.П. Карачевцева, А.А. Коханов, А.А. Конопихин [и др.] // Астрономический вестник. – 2015. – Т. 49, № 2. – С. 100–116.
- [4] Служебная телевизионная система КА Луна-25 / Г.А. Аванесов, А.В. Бережков, Р.В. Бессонов, С.В. Воронков [и др.] // Астрономический вестник. – 2021. – Т. 55, № 6. – С. 601–617.
- [5] Галимов, Э.М. Состояние и перспективы исследования Луны и планет // Вестник РАН. – 2004. – Т. 74, № 12. – С. 1059–1081.
- [6] Академик Лев Зеленый о предыстории проекта «Луна-25» и его целях – Текст: электронный // 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).
- [7] 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. – No 11(1). – P. 89–93.
- [8] Очки виртуальной реальности Pimax 4k VR // irift: [сайт]. – 2019. – URL: <https://irift.ru/product/ochki-virtualnoj-realnosti-pimax-4k-vr> (дата обращения 05.12.2023).
- [9] Очки виртуальной реальности Pimax 8K VR // irift: [сайт]. – 2019. – URL: <https://irift.ru/product/ochki-virtualnoj-realnosti-pimax-8k-vr-s-kontrollerami> (дата обращения 05.12.2023).
- [10] Нейробиология против виртуальной реальности // Хабр. Сообщество IT-специалистов: [сайт]. – 2023. – URL: <https://habr.com/ru/companies/asus/articles/378801/> (дата обращения 05.12.2023).
- [11] Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ // Система нормативных документов «Меганорм»: сайт. – 2023. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763666.htm> (дата обращения 05.12.2023).
- [12] Усеченный икосаэдр // Википедия: [сайт]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 05.12.2023).

## REFERENCES

- [1] On the Features of Professional Activity of Cosmonauts When Implementing Lunar Missions / B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, V.I. Yaropolov, Yu.B. Sosyurka [at al.] // *Manned Spaceflight*. – 2016. – No 2(19). – P. 35–57.
- [2] Motsar, P.I. Analysis of the Use of Display Equipment for Visualization Systems of Aviation Simulators / P.I. Motsar, V.P. Zinchenko, I.A. Korchin // *Information Processing Systems*. – 2006. – Issue 9(58).
- [3] Cartographic-and-geodetic Methods for Characterizing the Landing Sites of the Russian Future Missions Lunar-Globe and Lunar-Resources / P. Karachentseva, A.A. Kokhanov, A.A. Konopikhin [at al.] // *Astronomical Bulletin*. – 2015. – Vol. 49, No 2. – P. 100–116.
- [4] The Service Television System of the Luna-25 Lunar Lander / G.A. Avanesov, A.V. Berezhkov, R.V. Bessonov, S.V. Voronkov [at al.] // *Astronomical Bulletin*. – 2021. – Vol. 55, No 6. – P. 601–617.
- [5] Галимов, Э.М. Состояние и перспективы исследования Луны и планет // *Вестник РАН*. – 2004. – Т. 74, № 12. – С. 1059–1081.
- [6] Academician Lev Zeleny on the Background of the Luna-25 Project and its Goals – Text: Electronic // *Russian Academy of Sciences*: [website]. – Moscow, 2023. – URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=ba212996-e6d0-4175-9c20-e2348354e7fa> (accessed 05.12.2023).
- [7] Mapping of the Territory During Geoecological Monitoring by Means of GIS / B.S. Lunev, P.A. Krasilnikov, S.A. Ilarionov, B.A. Spassky [et al.] // *Fundamental Research*. – 2014. – No 11(1). – P. 89–93.
- [8] Virtual Reality Glasses Imax 4k VR // rift: [website]. – 2019. – URL: <https://irift.ru/product/ochki-virtualnoj-realnosti-pimax-4k-vr> (accessed 05.12.2023).
- [9] Pimax 8 VR Virtual Reality Glasses // irift: [website]. – 2019. – URL: <https://irift.ru/product/ochki-virtualnoj-realnosti-pimax-8k-vr-s-kontrollerami> (accessed 05.12.2023).
- [10] Neuroscience Versus Virtual Reality // *Habr. Community of IT Specialists*: [website]. – 2023. – URL: <https://habr.com/ru/companies/asus/articles/378801/> (accessed 05.12.2023).
- [11] Instructions for Topographic, Geodetic and Navigation Support of Geological Exploration // *System of Normative Documents “Meganorm”*: [website]. – 2023. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763666.htm> (accessed 05.12.2023).
- [12] Truncated icosahedron // *Wikipedia*: [website]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (accessed 05.12.2023).