

ОБЗОРЫ

OVERVIEWS

УДК 629.785

DOI 10.34131/MSF.19.2.96-113

МИССИИ-АНАЛОГИ ЕКА, ПРОВОДИМЫЕ В ИНТЕРЕСАХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В ДАЛЬНИЙ КОСМОС: CAVES, PANGAEA, :envihab, ESOL

П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов, В.С. Коренной, Ю.И. Онуфриенко

Канд. техн. наук, ст.н.с. П.П. Долгов; канд. техн. наук, ст.н.с. Е.Ю. Иродов;
канд. техн. наук, ст.н.с. В.С. Коренной; канд. техн. наук Ю.И. Онуфриенко
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье проведен обзор миссий-аналогов, проводимых ЕКА в интересах осуществления пилотируемых полетов в дальний космос. Рассмотрены: проект CAVES по исследованию и отработке технологий в пещерах, проект PANGAEA по отработке программ геологической подготовки астронавтов и технологий в ударном кратере, каньоне и на вулканическом острове, проект :envihab по исследованию человека в многофункциональном модульном медицинском исследовательском комплексе, проект ESOL по отработке лунных миссий на комплексе искусственных лунных аналогов. Проанализированы цели, задачи и направления исследований в рамках каждого проекта. **Ключевые слова:** миссия-аналог, дальний космос, астронавт, внекорабельная деятельность, экстремальные условия, скафандр.

Analogue Missions Performed by ESA in the Interests of Crewed Flights to Deep Space: CAVES, PANGAEA, :ENVIHAB, ESOL.

P.P. Dolgov, E.Yu. Irodov, V.S. Korennoy, Yu.I. Onufrienko

The paper reviews analogue missions performed by ESA in the interests of crewed flights to deep space. The following projects are considered here: the CAVES project is designed to study and mature technologies in caves; the PANGAEA project is designed to work out the programs for geological training of astronauts and the technologies in an impact crater, canyon and volcanic island; the :envihab project is designed to examine humans using multifunctional modular medical research complex; and the ESOL project is designed to develop lunar missions using the complex of artificial lunar counterparts. The objectives, tasks and research lines are analyzed for each project.

Keywords: analogue mission, deep space, astronaut, extra vehicular activity, extreme conditions, space suit.

Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы предусматривает создание необходимого задела для полномасштабного исследования Луны после 2025 года и осуществление к 2030 году высадки человека на

Луну. Это обуславливает актуальность проработки вопросов подготовки космонавтов к работам на поверхности Луны [1]. Подготовка космонавтов к деятельности на поверхности Луны должна будет проводиться в условиях, сходных по различным показателям с условиями на Луне. По мнению специалистов ведущих космических агентств, среды-аналоги реальных условий (природные, искусственные и смешанные лунные аналоги) являются эффективными инструментами для поддержки разработки, демонстрации и проверки новых технологий и эксплуатационных концепций в интересах программ полетов на Луну. Лунные аналоги, которые воспроизводят аспекты космоса на Земле, предоставляют ценную испытательную площадку для инструментов и концепций, а также место для исследований и тренировочную площадку для космонавтов. В работах [2, 3] авторами были рассмотрены миссии-аналоги, проводимые НАСА и ЕКА в интересах осуществления пилотируемых полетов в дальний космос: марсианский проект Хотон; программа исследования и отработки технологий в пустыне; программа демонстрации использования местных ресурсов; проект «озеро Павилион»; проект «Марсианская арктическая научно-исследовательская станция»; миссии НАСА по операциям в экстремальной окружающей среде; Международная космическая станция – стенд-аналог для исследований; проект «Марсианский двор» и некоторые другие. В данной статье рассмотрены еще несколько новых проектов ЕКА, выполняемых в рамках подготовки к полетам в дальний космос и, прежде всего, к пилотируемым полетам на Луну.

Проект CAVES

Окружающая среда: пещеры

Проект CAVES реализуется ЕКА на итальянском острове Сардиния в пещере Са Грутта (Sa Grutta) пещерного комплекса Супрамонте (Supramonte). Эта пещерная система находится всего в нескольких километрах от цивилизации и все же достаточно удалена, чтобы обеспечить изоляцию, типичную для космического полета.

Аббревиатура CAVES расшифровывается как **Cooperative Adventure for Valuing and Exercising Human Behaviour and Performance Skills** (групповой рискованный поход для оценки и отработки поведения и навыков деятельности человека).

При определении основных целей участия астронавтов (космонавтов, тайконавтов) в данном проекте, его разработчики считают, что точно так же, как в космическом полете, для успешного завершения миссии в пещере необходимо, чтобы астронавты:

- приспособились к совместному проживанию и работе в сложной обстановке;
- уделяли постоянное внимание правилам безопасности, порядку выполнения работ и ограниченным ресурсам;
- выполняли и документировали поставленные научные задачи;

- преодолевали критические ситуации;
- противостояли логистическим проблемам и их психологическим последствиям;
- привыкли к отсутствию частной жизни и комфорта;
- сотрудничали и проявляли свои лидерские качества.

Пещеры – одна из природных сред, которая очень реалистично имитирует среду обитания внеземных исследователей. Пещеры – это темные, отдаленные места с постоянной температурой, многими логистическими проблемами и стрессами (изоляция, трудности с коммуникацией и снабжением, физические препятствия). Их исследование требует дисциплины, командной работы, технических навыков и большой поведенческой адаптации. Кроме того, пещеры представляют собой враждебную и опасную среду, в которой должны учитываться полученные знания в части порядка выполнения работ и четкого следования требованиям правил безопасности.

Перемещение в пещере (либо по горизонтали с использованием тросов, либо по вертикали с использованием альпинистского снаряжения) требует постоянного внимания, умелого использования инструментов и доверия к снаряжению. Эти действия похожи на выходы в открытый космос, потому что они требуют безопасного крепления, трехмерной ориентации, избегания опасных зон, а также тщательного планирования и командной работы [4].

Типовой план-график каждой миссии состоит из 3 этапов:

1. Предварительное обучение, которое проводится в течение четырех первых дней и включает альпинистскую подготовку, изучение правил безопасности, методов исследования пещер, особенностей фотосъемки в пещерах, методов ориентации, а также методик выполнения запланированных научных исследований.

2. Расширенная разведка пещер, которая проводится в течение шести дней и включает переход к назначенному месту и разбивку базового лагеря, проведение картографирования заданных участков пещер, выполнение научных исследований, возвращение на поверхность. В качестве основных задач научных исследований, выполняемых в пещерах астронавтами, являются работы по биологии, окружающей среде, геологоразведке, метеорологии, микробиологии, минералогии и гидрохимии.

3. Подведение итогов, которое проводится в течение двух заключительных дней и включает обсуждение результатов работы в команде, составление отчетов по отдельным научным задачам и в целом по миссии.

В рамках проекта CAVES в период с 2011 года по 2016 год осуществлено пять международных миссий, в которых приняли участие 26 астронавтов из шести космических агентств – Европы (ESA), Японии (JAXA), США (NASA), России (Roscosmos), Китая (CNSA) и Канады (CSA). Представительство (количество астронавтов) космических агентств в каждой из пяти миссий проекта CAVES показано на рис. 1. При этом российские космонавты принимали участие во всех пяти миссиях.

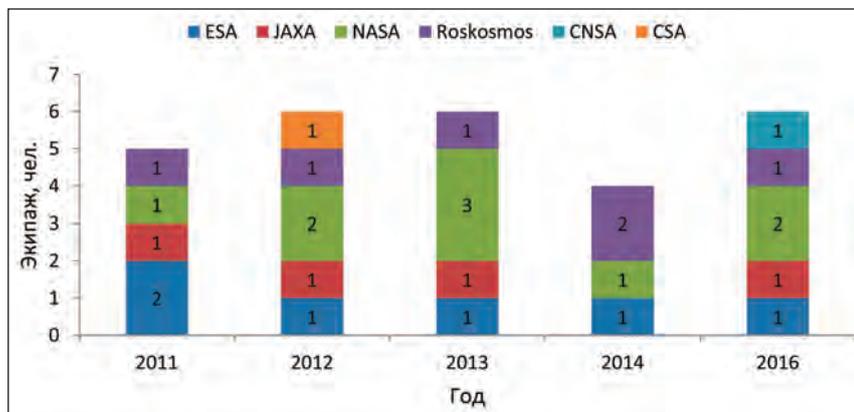


Рис. 1. Состав участников миссий проекта CAVES

В работах по проекту CAVES приняли участие шесть российских космонавтов: С.Н. Рыжиков (2011 г.), Н.В. Тихонов (2012 г.), А.Н. Овчинин (2013 г.), А.А. Мисуркин (2014 г.), С.В. Кудь-Сверчков (2014 г.) и С.В. Корсаков (2016 г.), фотографии с тренировок которых показаны на рис. 2.



С.Н. Рыжиков



Н.В. Тихонов



А.Н. Овчинин



А.А. Мисуркин



С.В. Кудь-Сверчков



С.В. Корсаков

Рис. 2. Российские космонавты, участвовавшие в проекте CAVES [4]

Проект CAVES признан всеми участвовавшими астронавтами, в том числе, имеющими опыт космических полетов, в качестве очень реалистичного аналога космического полета. Деятельность в условиях пещер характеризуется: необходимостью адаптации к условиям окружающей среды, воздействием стресса и усталости, необходимостью постоянного выполнения требований безопасности. Задачи по разведке и документированию, а также научная деятельность предоставляют реалистичный набор технических задач, которые выполняются в формате, подобном космическому полету.

Проект PANGAEA

Окружающая среда: ударный кратер, каньон и вулканический остров

Название проекта PANGAEA (Planetary ANalogue Geological and Astrobiological Exercise for Astronauts) расшифровывается как планетный аналог геологических и астробиологических тренировок для астронавтов. Проект назван в честь древнего земного суперконтинента Пангеи (*англ. Pangea*) [5].

В будущих миссиях астронавты будут исследовать планетные геологические условия с целью решения важных научных вопросов путем отбора проб и документирования в полевых условиях. В связи с этим основной частью проекта PANGAEA является создание учебного курса по планетарной геологии для европейских астронавтов, чтобы они стали эффективными партнерами ученых и инженеров при разработке будущих исследовательских миссий. Обучение на Земле в местах со схожими с Луной геологическими особенностями и условиями эксплуатации является необходимым шагом не только для выявления наиболее перспективных образцов, но также для эффективной связи между астронавтами и научной поддержкой с Земли во время геологических исследований планетных тел.

Цели учебного курса:

- получить базовые знания о геологических процессах и окружающей среде Земли, Луны, Марса и астероидов;
- развить навыки наблюдений и принятия решений для определения геологических особенностей, выполнения эффективного отбора проб и краткого и правильного информирования служб наземного контроля;
- научить распознавать и описывать среду, в которой может существовать внеземная жизнь.

Учебный курс разделен на 3 последовательно выполняемых этапа и проводится в течение года в следующих местах (планетарных аналогах):

1. Геология Земли и Луны в ударном кратере Нордлингер Рис (*нем. Nördlinger Ries*), расположенном на юго-западе Германии.

2. Марсианская осадочная геология и поверхностные процессы в каньоне Блеттербах (*итал. La gola del Bletterbac*), расположенном на севере Италии.

3. Геологическая полевая подготовка и астробиология на вулканическом острове Лансароте (*исп. Lanzarote*), входящем в состав Канарских островов, Испания [5].

Конечной целью последнего этапа для астронавтов является самостоятельная подготовка и выполнение геологических и геомикробиологических обходов участков местности, при этом используется гибкий метод выполнения задач – астронавт имеет свободу изменения запланированных задач в реальном времени на основе текущих полевых наблюдений. Особое внимание обращается на предотвращение загрязнения образцов, а также оценку, как конкретные операционные параметры, инструменты анализа и поддержки принятия решений, поддерживающие технологии влияют на документирование и процесс отбора проб.

Всего в период с 2016 года по 2018 год в рамках проекта PANGAEA проведено три учебных курса. В них приняли участие астронавты ЕКА Лука Пармитано, Педро Дуке, Матиас Маурер, Саманта Кристофоретти, Томас Райтер, а также российский космонавт Сергей Кудь-Сверчков.

В дополнение к целям обучения астронавтов в области полевой геологии, в ноябре 2017 года ЕКА предложила структуру PANGAEA внутренним участникам проекта, партнерским агентствам и внешним исследователям в качестве аналоговой тестовой кампании, называемой PANGAEA-eXtension (сокр. PANGAEA-X), усилия которой сосредоточены на отработке технологий и эксплуатационных концепций для полевой геологии и разведки [5].

Две основные цели были связаны с выбором экспериментов для кампании:

- тестирование технологий и операций для геологического и геомикробиологического отбора проб;

- тестирование технологий для разведки, картографии, навигации и связи в условиях слабого освещения, лавовых труб и пересеченной местности.

Обе эти цели находятся в пределах общей цели, чтобы получить знания о том, как разрабатывать стратегии разведки и полевой геологии для планетарных миссий, с особым акцентом на лунные условия.

Было предложено пятнадцать экспериментов одиннадцатью различными научно-исследовательскими институтами и компаниями, в которых участвовали четыре космических агентства, что позволило разработать программу испытаний с амбициозным набором взаимосвязанных целей с результатами, применимыми для исследования человека, роботов и их совместной деятельности.

Операционные концепции для геологического отбора проб во время выхода в открытый космос сравнивались при испытании новых аналитических и механических инструментов, обеспечивающих сбор образцов в реальных условиях окружающей среды и различных ситуациях.

Ряд технологических приложений был использован для получения навигационной и геологической информации на участках испытаний с помощью трехмерного сканирования и фотограмметрии с дронов. В средах с лавовыми

трубами микробиологический отбор проб сочетался с выполнением на месте процесса секвенирования ДНК (определение нуклеотидной последовательности) пещерной микробиоты (микрофлоры и микрофауны) портативным прибором, дистанционным зондированием и трехмерным картированием, а также тестированием подземных коммуникационных инструментов. Геофизические технологии использовались, чтобы идентифицировать подземные пустоты и характеризовать геологический субстрат. Все эти тесты и эксперименты были выполнены с участием европейских астронавтов и при содействии экспертов по эксплуатации и обучению ЕКА с целью оценки потенциальных применений и разработок для будущих миссий и обучения астронавтов.

Одним из инновационных инструментов, разработанных ЕКА и тестируемых в рамках проекта PANGAEA-X, является «Электронная полевая книга» (Electronic Field Book, сокр. – EFB). Этот инструмент объединяет позиционирование в реальном времени, обмен данными, голосовой чат и многое другое. EFB может записывать каждый этап экспедиции и связывать образцы с местами и другими наборами образцов. Каждое взаимодействие с учеными также хранится в системе. EFB объединяет входные данные от других внешних инструментов, таких, как микроскопы, видеокамеры кругового обзора или спектрометры. Карты местности, глоссарий и библиотека минералов также доступны пользователю. В будущем предполагается, что панорамные изображения будут передаваться на виртуальные гарнитуры ученым, находящимся на Земле, или другому члену экипажа лунной экспедиции, что позволит им видеть окружающую местность «глазами астронавта». Внешний вид EFB и один из вариантов интерфейса при работе показаны на рис. 3.

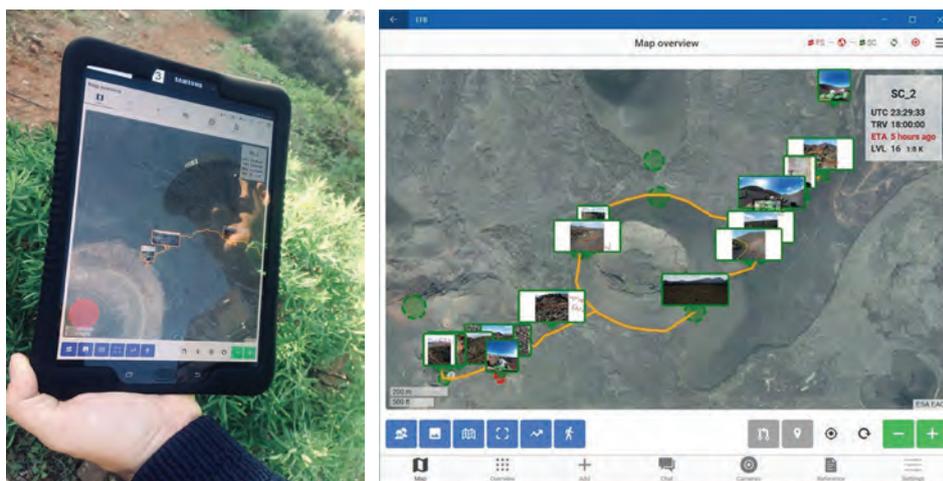


Рис. 3. Электронная полевая книга [5]

Обновленная версия EFB была впервые использована в Лансароте в 2018 году. Полевые ретрансляторы с радиусом действия до 100 м обеспечивали связь с научными группами даже во время экспедиции в лавовой трубе.

Проект PANGAEA представляет собой одну из программ обучения астронавтов и испытаний элементов космической техники, направленных на совместное исследование планет солнечной системы человеком и роботами. Результаты выполненных работ показали, что развитие навыков определения геологических особенностей изучаемых объектов, выполнения эффективного отбора проб, документирования результатов, ведения репортажей и поддержания связи с наземными службами контроля потребует реализации совместной программы подготовки и полевых испытаний.

Проект :envihab

Окружающая среда: многофункциональный модульный медицинский исследовательский комплекс

Комплекс представляет собой земной аналог научного комплекса для проведения исследований в области медицины и биологии на МКС и для будущих полетов человека в дальний космос. Название происходит от словосочетания «environmental habitat» и обозначает замкнутую систему жизнеобеспечения. Комплекс создан Институтом аэрокосмической медицины, входящим в состав Немецкого аэрокосмического центра (DLR), и предназначен для изучения в строго стандартизованных условиях воздействия экстремальных условий окружающей среды на людей и определения возможных мер профилактики и противодействия. Этот комплекс является единственным в своем роде и представляет собой уникальное сочетание лабораторий для исследований на людях и одновременно может служить в качестве наземного аналога космической станции. Кроме того, комплекс располагает идеальными условиями для проведения реабилитации астронавтов после полетов на МКС. На площади 3500 м² размещены восемь отдельных модулей (M1–M8), построенных по принципу «дом в доме» [6]:

1. Центрифуга короткого радиуса (M1).
2. Физиологическая и баромедицинская лаборатория (M2).
3. Лаборатория сна и физиологии (M3).
4. Лаборатория позитронно-эмиссионной и магнитно-резонансной томографии (M4).
5. Психологическая лаборатория (M5).
6. Биологическая лаборатория (M6).
7. Инфраструктурная зона (M7).
8. Зона общественного назначения (M8).

Схема расположения модулей в здании центра представлена на рис. 4.

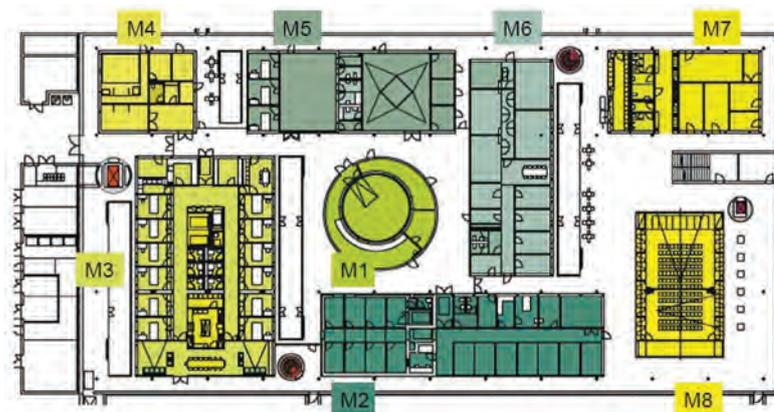


Рис. 4. Схема размещения модулей :envihab [6]

Центрифуга короткого радиуса (M1)

Радиус центрифуги равен 3,80 м. Максимальное радиальное ускорение 6 g (на внешнем радиусе), градиент перегрузки 0,2 g за секунду. Имеется возможность перемещения кабины во время вращения центрифуги. Возможна экспертиза четырех человек одновременно, рост испытуемых от 1,50 м до 2,10 м. Обеспечивается затемнение в зале центрифуги до 98 %, при этом яркость освещения регулируется в диапазоне 0–800 люкс.

Физиологическая и баромедицинская лаборатория (M2)

Физиологическая зона располагает общей площадью 200 м² и делится на семь блоков. Имеется возможность снижения содержания кислорода до 12 % в течение 5 часов (≈ 4500 м), а также увеличение содержания углекислого газа до 3 %, с изменением 1 % в час. Возможна независимая регулировка температуры и влажности. Обогащение кислородом в гипобарических условиях до максимального парциального давления 220 мбар.

Баромедицинская зона располагает общей площадью 110 м² и делится на восемь блоков. Имеется возможность снижения давления окружающей среды до минимального 300 мбар (≈ 9000 м), а также снижение содержания кислорода до 12 % в течение 5 часов (≈ 4500 м). Возможно увеличение содержания углекислого газа до 3 %, с изменением 1 % в час. В наличии имеется внутренняя канализация, а также шлюзы для доступа и снабжения персонала (питание и т.д.).

Лаборатория сна и физиологии (M3)

Располагает общей площадью 364 м², имеется 12 индивидуальных комнат (по 12,9 м²) для испытуемых и комната для отдыха (71 м²). Имеется возможность снижения содержания кислорода до 12 % в течение 5 часов (≈ 4500 м), а также увеличения содержания углекислого газа до 3 %, с изменением 1 % в час. Интенсивность света в каждой комнате регулируется от 0,5 до 1500 люкс,

контроль спектрального состава света в каждой комнате осуществляется по LED-технологии. Имеется возможность забора крови во время сна без помех участникам исследования. Проводится независимая регулировка температуры и влажности. Имеется кухня для приготовления пищи.

Лаборатория позитронно-эмиссионной и магнитно-резонансной томографии (ПЭТ и МРТ) (М4)

Лаборатория оборудована молекулярным МРТ и ПЭТ сканером «Siemens Biograph mMR». Производится МРТ всего тела (индукция магнитного поля 3 Тл) со встроенной ПЭТ. Для визуализации используется натриевая катушка (^{23}Na), а для локальной спектроскопии фосфорная катушка (^{31}P). Имеется MR-совместимый эргометр бедра и голени, комбинируемый с различными катушками. Имеется fMRI (функциональная магнитно-резонансная томография для измерения активности мозга). В качестве ПЭТ нуклида используется изотоп фтора (^{18}F).

Психологическая лаборатория (М5)

Лаборатория общей площадью 258 м² разделена на две зоны, соединенные системой двойных дверей. Одна зона площадью 130 м² – специальная звукоизолированная. Обеспечиваются условия изоляции и конфиденциальности для шести испытуемых параллельно. Температура и влажность независимо регулируются.

Биологическая лаборатория (М6)

Лабораторная зона состоит из 5 лабораторных комнат (одна из которых – чистая комната класса ISO 8), комнаты для подготовки к эксперименту, четыре комнаты для медосмотров, две для медицинской подготовки. Имеется помещение для проведения семинаров вместимостью до 10 человек. Все лаборатории оснащены высокотехнологичными лабораторными столами, лабораторными холодильниками, морозильниками с температурой до –80 °С. Кроме того, в наличии холодильные инкубаторы, инкубаторы-шейкеры, шкафы биологической безопасности и лабораторная стиральная машина, автоклав, стерилизатор и система очистки воды.

Инфраструктурная зона (М7)

Данный модуль включает в себя центр информационных технологий, все интеллектуальные системы и инфраструктуру для обслуживания здания, а также объекты питания для зоны общественного назначения.

Зона общественного назначения (М8)

Общественная зона размещается на площади около 1500 м² и включает зону оказания выездных услуг общественного питания, выставочную зону и лекционный зал. Лекционный зал может принять до 150 посетителей, имеется возможность разделить на два зала и иметь проекционные экраны в каждом зале.

Проект :enviHab направлен на изучение организма человека при воздействии комплекса стандартизированных условий. Получаемые данные могут быть использованы в качестве отправной точки для перспективных задач моделирования, которые потребуются во всех областях медицины в будущем. В зависимости от плана исследования испытуемые могут быть изолированы, иммобилизованы и/или подвергнуты воздействию индивидуальных или комбинированных целевых стрессовых ситуаций. Кроме того, физические и психологические методы восстановления могут быть изучены в условиях строго контролируемой и воспроизводимой окружающей среды.

В рамках Программы исследований человека НАСА в партнерстве с DLR в 2017 году спланировали и провели в :enviHab миссию VaPER (VIP и Psychological :enviHab Research). Эта миссия являлась частью проекта «Нарушение зрения и внутричерепного давления» (VIP), в котором изучается влияние долгосрочного воздействия микрогравитации на структуру глаза и зрение членов экипажей МКС до полета и после их возвращения на Землю. Отличительная особенность этой миссии была в том, что комплекс :enviHab обеспечил возможность нахождения участников VaPER в течение 30 дней в постели в антиортостатическом положении (шесть градусов) и дыхание воздухом с повышенным содержанием углекислого газа (0,5 %). В 2019 году предполагается проведение миссии AGBRESA (постельный режим с искусственной гравитацией – Европейское космическое агентство). Будет изучаться возможность использования искусственной силы тяжести (вращение на центрифуге короткого радиуса) для уменьшения негативных последствий невесомости (моделируется 60-дневным постельным режимом).

Проект ESOL

Окружающая среда: комплекс искусственных аналогов

По мнению специалистов ЕКА, искусственные лунные аналоги имеют существенные преимущества перед природными. В рамках Программы общих исследований ЕКА (ESA's General Studies Programme – GSP) специально созданным консорциумом были проведены исследования лунных аналогов (проект Lunar Analogues – LUNA). Цель этого исследования ЕКА состояла в том, чтобы определить потребности в искусственных лунных аналогах, проанализировать, достаточно ли существующих и планируемых искусственных лунных аналогов в Европе и во всем мире для удовлетворения этих потребностей, есть ли пробелы в функциональных возможностях аналогов и представить новые искусственные лунные аналоги для устранения выявленных пробелов.

В целом, весь процесс идентификации потребностей привел к выявлению 159 потребностей в искусственных аналогах. Эти потребности были ранжированы в соответствии с их значимостью в дорожных картах, справочных миссиях и публикациях, а также в отношении их важности для

специалистов-экспертов. Из них 19 потребностей получили высокую оценку значимости. Эти потребности, названные «ведущими потребностями», были объединены в следующие основные группы:

- исследование возможностей использования лунных ресурсов – тестирование технологий добычи и переработки для сухого и ледяного реголита, а также строительных технологий;
- изучение влияния коммуникационных ограничений (пропускной способности, задержки по времени) на телеоперации и развертывание робототехники;
- разработка мер защиты от лунной пыли и уменьшения отрицательных последствий ее воздействия;
- верификация и валидация систем, процедур и новых эксплуатационных концепций с участием экипажа;
- оценка выполнения операций внекорабельной деятельности в условиях лунной гравитации, включая эргономические испытания инструментов;
- испытание систем регулирования окружающей среды и обеспечения жизнедеятельности полужамкнутого и замкнутого цикла.

Проведенный анализ потребностей и пробелов дал представление о том, какие из существующих искусственных лунных аналогов в Европе уже имеют хороший потенциал (т. е. одновременно удовлетворяют несколько потребностей) и, таким образом, представляют собой «основные места» для развития в направлении более полного искусственного лунного аналога. Всего было выявлено три таких места – в Италии, Франции и Германии. Для каждого из этих основных мест были разработаны общие концепции создания искусственного лунного аналога. Основываясь на трех общих концепциях, которые были представлены в среднесрочном обзоре исследования, ЕКА выбрало аналоговую концепцию ЕАС/DLR для дальнейшего рассмотрения в отношении уточнения технической концепции, установления сценариев использования и концепций реализации. Эта концепция лунного аналога получила название «Европейская лаборатория наземных операций» (European Surface Operations Laboratory – ESOL).

Техническая концепция ESOL

Немецкий аэрокосмический центр (DLR) в Кельне содержит несколько существующих аналоговых объектов – в комплексе :envihab и в Европейском центре астронавтов (ЕАС), что делает его хорошей базой для реализации объекта искусственного лунного аналога.

Средства ЕАС уже включают в себя комплекс нейтральной плавучести (NBF), инфраструктуру классов и аудиторий, центр управления полетами/моделированием и большой тренировочный зал, в котором можно выделить большую площадь для новых компонентов искусственного аналога. Помимо вышеупомянутых объектов, ЕАС обладает очень специфическим и ценным человеческим капиталом: непосредственным опытом и ноу-хау

от астронавтов, инструкторов, врачей экипажа и группы медицинской поддержки астронавтов.

Для проведения моделирования лунных миссий предлагается внедрить в учебном зале ЕАС следующие компоненты (в скобках указаны обозначения, использованные на рис. 5) [7]:

- испытательный стенд с имитатором реголита (Regolith Testbed);
- обитаемый модуль на основе саморазвертываемого отсека для работы в экстремальных условиях, разработанный ЕКА в 2012–2015 годах (Self-deployable Habitat for Extreme Environments – SHEE Habitat);
- два макета скафандров для внекорабельной деятельности, пригодные для использования как при погружении под воду в NBF, так и в сухой среде на испытательном стенде с имитатором реголита (EVA suit);
- система гравитационной разгрузки, пригодная для моделирования лунной гравитации как для операторов в скафандрах, так и для луноходов (Gravity off-loading);
- электронный стенд-имитатор лунохода, моделирующий шесть степеней свободы с визуализацией виртуальной реальности поверхности Луны (Full Motion Simulator);
- центр управления полетами (MCC);
- площадка для отработки операций по использованию лунных ресурсов, включая 3D-печать (ISRU/3D area);
- стыковочный/шлюзовой отсек (Node);
- порт скафандра для выхода на поверхность Луны (Suitport).

Проект схемы размещения перечисленных компонентов показан на рис. 5.

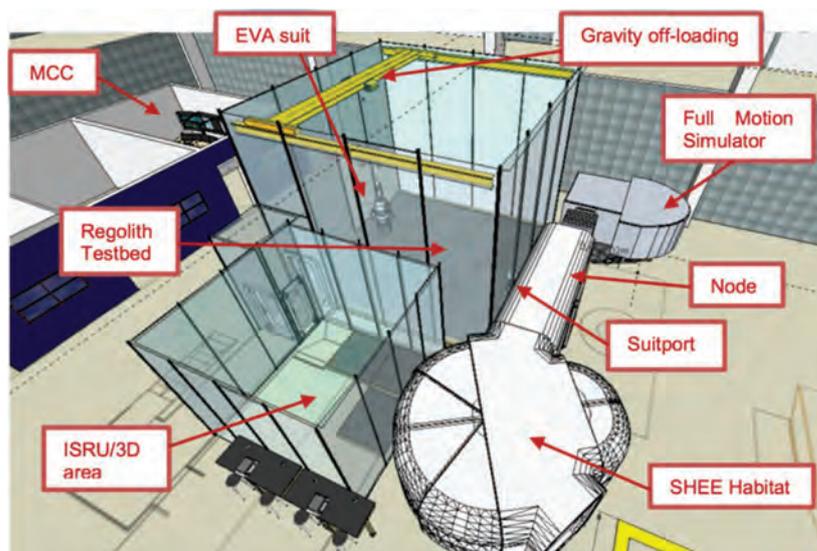


Рис. 5. Схема размещения компонентов ESOL [7]

Кроме того, в новом здании рядом со зданием ЕАС предлагается построить испытательный стенд для луноходов площадью около 1000 м^2 с морфологией лунного рельефа. Этот большой испытательный стенд также будет полезен для тестирования технологий 3D-печати крупных конструкций путем спекания лунного реголита с использованием солнечной энергии или других методов. В октябре 2018 года Европейским космическим агентством, Немецким аэрокосмическим центром и французской компанией Air Liquide было подписано соглашение о том, что они объединяют усилия для создания, эксплуатации и использования энергетического объекта, который имитирует поставки энергии для лунной базы. Цель состоит в том, чтобы проверить технологии извлечения воды для производства водорода и использовать его в качестве энергоносителя. В условиях, близких к тем, которые встречаются на Луне, будут проверяться различные типы материалов и производственных процессов, начиная с водородного топливного элемента, который будет поставляться компанией Air Liquide.

Концепции использования ESOL

1) *Проведение экспериментов по проекту HERACLES (Human-Enabled Robotic Architecture and Capability for Lunar Exploration and Science).* Проект HERACLES (робототехническая архитектура с поддержкой человеком и возможности для разведки и научных исследований Луны) предусматривает посадку на лунную поверхность лунохода с помощью взлетно-посадочного аппарата, предварительно доставленного на станцию, находящуюся в окололунном пространстве. На поверхности луноход будет собирать образцы лунного грунта в специальный контейнер. Луноход будет иметь как автономный режим работы, так и телеуправляемый, в котором он взаимодействует с экипажем, находящимся на окололунной станции. Луноход возвращает контейнер обратно на взлетно-посадочный модуль, который запускается к окололунной станции. После стыковки со станцией, экипаж извлекает контейнер с образцами, хранит его внутри станции, выполняет предварительную научную оценку и возвращается с ним на Землю. Первая фаза этого эксперимента HERACLES (HOPE-1) является наземным экспериментом и предполагает 7-дневное моделирование с одним членом экипажа в автономном модуле, выполняющим дистанционные телеоперации как часть своего типового ежедневного графика (физические упражнения, техническое обслуживание систем, прием пищи). При этом осуществляется полная изоляция от внешнего мира, за исключением радиосвязи и передачи данных в Центр управления полетами. Эксперименты первой фазы могут быть полностью выполнены в ESOL, включая SHEE Habitat, Центр управления полетами (включая поддержку связи) и большой испытательный стенд с луноходом.

2) *Комплексная аналоговая миссия, ежегодная, организуемая ЕКА.* Для этой миссии экипаж может быть выбран из действующих астронавтов ЕКА и добровольцев (аналогично выбору экипажа для аналогов CAVES

и NEEMO). Эти миссии предполагается использовать Европейским центром космических исследований и технологий (ESTEC) для тестирования/проверки новых концепций операций, а также оперативной апробации технических систем, таких, как:

- система экологического контроля и жизнеобеспечения (ECLSS) или система микробиологического анализа качества воздуха для космоса (MIDASS) в обитаемом модуле с экипажем от двух до четырех человек;
- технологии защиты от лунной пыли;
- системы использования лунных ресурсов при работе с «ледяным» реголитом и химически точными имитаторами реголита;
- перемещение луноходов с моделированием физических условий, близких к натурным, и дистанционным управлением по каналам связи, имеющим задержку по времени и ограниченную пропускную способность.

3) *Исследования долгосрочной изоляции.* Миссии, аналогичные тем, которые проводятся в рамках Программы исследований человека (HRP) НАСА по проекту HERA (The Human Exploration Research Analog) (HERA), могут проводиться в ESOL с уникальной возможностью полной интеграции обитаемого модуля через шлюзовую отсек с испытательным стендом с имитатором реголита, а также с электронным стендом-имитатором лунохода. Это позволит экипажу выполнять наземную отработку операций ВКД непосредственно из обитаемого модуля, выполняя выход/вход через соответствующие порты, а также моделировать длительные перемещения в герметичном луноходе. В дальнейшем рекомендуется модернизировать обитаемый модуль с точки зрения объема и жизнеобеспечения, чтобы иметь возможность разместить в нем от четырех до шести членов экипажа.

4) *Использование в проекте Spaceship EAC.* Основная цель проекта Spaceship EAC (космического корабль Европейского центра астронавтов) заключается в разработке эксплуатационных концепций и технологий с низким уровнем готовности (по шкале TRL) для поддержки миссий по исследованию космического полета человека (с особым акцентом на сценарии лунного обитания). В последнее время проект Spaceship EAC существенно расширился. В 2015 году команда проекта состояла из 15 человек (13 стажеров или аспирантов, 1 сотрудник ЕКА и 1 научный сотрудник на полный рабочий день). В ближайшие годы в космический проект планируется ежегодно привлекать 30–50 магистров и/или аспирантов под руководством 2–3 научных сотрудников. В настоящее время реализуются проекты в области энергетических исследований (например, системы генерирования электроэнергии с использованием топливных элементов для лунной базы, накопления энергии с использованием лунного реголита), аддитивные технологии с использованием переработки и спекания лунного реголита, очистки и рециркуляции воды (например, эксперимент по гидропонике и выращиванию растений), моделирование и исследование приспособленности для длительного пребывания людей (например, виртуальная лунная база и ВКД).

Испытательный стенд ESOL для моделирования лунного реголита, обитаемый модуль, симулятор поверхности виртуальной реальности и симулятор системного уровня позволят объединить исследования и операции по Spaceship EAC.

5) *Использование Немецкого аэрокосмического центра.* Комплекс ESOL, размещаемый на площадке DLR в Кельне, будет стимулировать исследовательские группы на местах в тестировании и валидации новых технологий. Для этой цели средства ESOL будут использоваться неинтегрированным образом, то есть в качестве лаборатории или испытательного стенда. Например, Институт физики материалов в космосе, входящий в состав DLR, который может использовать испытательный стенд с высококачественными физическими и химическими имитаторами лунного реголита для тестирования процессов ISRU, таких, как 3D-печать. Также и с медицинскими исследовательскими группами в DLR будет взаимобогащение: ESOL предлагает дополнительные возможности проекту :enviHab для испытаний на людях. Например, в ESOL может быть проведено интегрированное моделирование, а испытуемые могут быть изучены в :enviHab (сбор фоновых данных до начала и после завершения эксперимента).

Проект ESOL является «миссия-ориентированным аналогом» и предназначен для высокоинтегрированного моделирования условий деятельности людей и роботов, для тестирования сценариев миссий, определения напряженности циклограмм и операций, обучения астронавтов для выполнения операций на поверхности Луны. Соответствующие средства, имеющиеся в DLR, а также специфический и ценный человеческий капитал – непосредственный опыт и ноу-хау от астронавтов, инструкторов, врачей экипажа и группы медицинской поддержки астронавтов – позволят обеспечить достижение целей комплекса ESOL.

Выводы

1. Для подготовки к осуществлению пилотируемых полетов на Луну ЕКА разработало и выполняет программу исследований, направленную на проверку концепций выполнения планируемых миссий, демонстрацию новых технологий решения всего спектра задач, которые будут выполняться на лунной поверхности.

2. С целью осуществления эффективной практической подготовки астронавтов по планетарной геологии разработаны специальные учебные курсы в условиях природных лунных аналогов. Параллельно с подготовкой астронавтов проводится тестирование технологий, эксплуатационных концепций и инструментов для эффективно организованного геологического отбора проб, наблюдения и документирования.

3. Для обеспечения возможности изучения воздействий на организм человека экстремальных условий создан земной аналог научного комплекса

с целью проведения исследований в области медицины и биологии на МКС и с целью будущих полетов на Луну – высокотехнологичный комплекс :envihab.

4. Для тестирования сценариев миссий, определения напряженности циклограмм и операций, исследования дистанционных операций и процедур и обучения астронавтов операциям на поверхности Луны разработана техническая концепция и начато создание комплексного искусственного лунного аналога (ESOL) на базе DLR.

5. Опыт проведения исследований ЕКА показывает, что в процессе разработки и реализации концепции российской лунной программы целесообразно организовать отечественные системные исследования по созданию отечественного межведомственного комплекса лунных аналогов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] К вопросу подготовки космонавтов для работы на поверхности Луны / Иродов Е.Ю., Долгов П.П., Коренной В.С., Крючков Б.И., Ярополов В.И. // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. № 1 (26). С. 71–89.
- [2] Миссии-аналоги НАСА, проводимые в интересах осуществления пилотируемых полетов в дальний космос: HMP, Desert RATS, ISRU, PLRP, FMARS / Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Коренной В.С. // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 3(20) – С. 68–79.
- [3] Миссии-аналоги НАСА, проводимые в интересах осуществления пилотируемых полетов в дальний космос: NEEMO, ISTAR, Mars Yard/Chamber, Antarctic/desert, Hi-SEAS. / Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Коренной В.С., Каспранский Р.Р. // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 4(21) – С. 43–56.
- [4] CAVES:Сайт European Space Agency (ESA) [Электронный ресурс]. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Caves (дата обращения 14.01.2019).
- [5] PANGAEA (Planetary ANalogue Geological and Astrobiological Exercise for Astronauts): Сайт ResearchGate [Электронный ресурс]. URL <https://www.researchgate.net/project/PANGAEA-Planetary-ANalogue-Geological-and-Astrobiological-Exercise-for-Astronauts> (дата обращения 22.02.2019).
- [6] :envihab - Future Research for Space and Earth: Сайт The German Aerospace Center (DLR) [Электронный ресурс]. <https://www.dlr.de/envihab/en/desktopdefault.aspx/tabid-6890/> (дата обращения 18.02.2019).
- [7] Analogues for Preparing Robotic and Human Exploration on the Moon: Сайт ResearchGate [Электронный ресурс]. URL https://www.researchgate.net/publication/303098584_Analogues_for_Preparing_Robotic_and_Human_Exploration_on_the_Moon (дата обращения 28.01.2019).

REFERENCES

- [1] Cosmonaut training for work on the lunar surface / Irodov E.Yu., Dolgov P.P., Korennoy V.S., Kryuchkov B.I., Yaropolov V.I. // Manned Space Flights. – 2018. No 1 (26). pp. 71–89.

- [2] NASA analogue missions, implemented in the interests of manned missions to deep space: HMP, Desert RATS, ISRU, PLRP, FMARS / Dolgov P.P., Irodov E.Yu., Korennoy V.S. // *Manned Space Flights*. – 2016. – No 3(20) – pp. 68–79.
- [3] Analogue missions of NASA implemented in the interests of manned deep space exploration: NEEMO, ISTAR, Mars Yard/Chamber, Antarctic/desert, Hi-SEAS / Dolgov P.P., Irodov E.Yu., Korennoy V.S., Kaspranskiy R.R. // *Manned Space Flights*. – 2016. – No 4(21) – pp. 43–56.
- [4] CAVES: European Space Agency (ESA) Website [Electronic]. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Caves (access date 14.01.2019).
- [5] PANGAEA (Planetary ANalogue Geological and Astrobiological Exercise for Astronauts): ResearchGate Website [Electronic]. URL <https://www.researchgate.net/project/PANGAEA-Planetary-ANalogue-Geological-and-Astrobiological-Exercise-for-Astronauts> (access date 22.02.2019).
- [6] :envihab - Future Research for Space and Earth: The German Aerospace Center (DLR) Website [Electronic]. <https://www.dlr.de/envihab/en/desktopdefault.aspx/tabid-6890/> (access date 18.02.2019).
- [7] Analogues for Preparing Robotic and Human Exploration on the Moon: ResearchGate Website [Electronic]. URL https://www.researchgate.net/publication/303098584_Analogues_for_Preparing_Robotic_and_Human_Exploration_on_the_Moon (access date 28.01.2019).