

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 004.942

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СИМУЛЯТОРА УПРАВЛЕНИЯ НАПЛАНЕТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

Б.И. Крючков, О.Г. Артемьев, П.Ю. Сухочев, В.А. Чертополохов,
М.Д. Белоусова, Д.С. Бурлаков, А.А. Некто, Д.В. Счастливецва,
Д.М. Швед

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; Герой Российской Федерации,
летчик-космонавт Российской Федерации, канд. экон. наук О.Г. Артемьев
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

П.Ю. Сухочев; канд. физ.-мат. наук В.А. Чертополохов; М.Д. Белоусова;
канд. физ.-мат. наук Д.С. Бурлаков (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Канд. мед. наук А.А. Некто; канд. биол. наук Д.В. Счастливецва;
канд. мед. наук Д.М. Швед (ГНИЦ РФ – ИМБП РАН)

К настоящему времени в НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина проведен цикл до- и послеполетных исследований с участием космонавтов по имитации управления НПТС на тренажерном комплексе «Выход-2» в рамках эксперимента «Созвездие». В данной статье оценивается опыт создания и применения симулятора, включая анализ рабочего процесса с операторской деятельностью и ее оценкой.

Ключевые слова: имитация, симулятор, напланетное транспортное средство, полунатурное моделирование, оценка операторской деятельности

The Experience of Creation and Use of the On-Planet Rover Control Simulator. B.I. Kryuchkov, O.G. Artemyev, P.Yu. Sukhochev, V.A. Chertopolokhov, M.D. Belousova, D.S. Burlakov, A.A. Nekto, D.V. Schastlivtseva, D.M. Shved

To date, the Yuri Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center has already conducted a series of pre- and post-flight studies involving cosmonauts in the simulation of the control of a manned planetary vehicle (MPV) on the «Vykhod-2» simulator as part of the Sozvezdie experiment. This paper evaluates the experience of the creation and use of the simulator, including an analysis of operator activity and its evaluation.

Keywords: simulation, simulator, on-planet roving vehicle, semi-realistic simulation, operator activity evaluation

Повышение уровня автоматизации и применение интеллектуальных роботизированных систем позволяет снизить нагрузку на человека в стандартных задачах и рутинных операциях, но не снижает роль человека в исследованиях, в качестве пилота и оператора особенно в аварийных и экстремальных ситуациях. Для подготовки человека к деятельности в экстремальных условиях применяются тренажеры, имитирующие визуальную и динамическую обстановку в космосе на основе соответствующих математических и натуральных моделей. Такие тренажеры позволяют готовить космонавтов к возможным нештатным ситуациям, а также оценивать качество и особенности их операторской деятельности. Оценка операторской деятельности применяется при отборе и подготовке специалистов, изучении изменения состояния человека после различных испытаний, при совершенствовании эргономических характеристик оборудования и методик его оценивания [1, 2].

Тренировка операторов «Лунохода-1» [3] проводилась в режиме телеуправления технологическим образцом лунохода с имитацией задержек передачи сигнала между Землей и Луной. Технологический образец двигался по территории полигона, специально созданного для имитации лунного ландшафта. Тренировка астронавтов NASA по управлению LRV проводилась на специально адаптированном для работы в условиях земной силой тяжести LRV 1-G trainer [3, 4]. Современные технологии позволяют моделировать динамику движения транспортного средства и визуальную обстановку с помощью компактных вычислительных систем и средств визуализации (экранов для имитации телеуправления, шлемов виртуальной реальности, коллимационных и стереоэкранов для имитации присутствия).

В 1977 г. механико-математический факультет МГУ начал разрабатывать специальное математическое обеспечение для системы управления динамическим стендом имитации полета многоразового транспортного космического корабля «Буран». С момента ввода в эксплуатацию центрифуги ЦФ-18 (1981) началась активная совместная работа МГУ и НИИ ЦПК по динамической имитации космического полета [5, 6].

В 2014 г. механико-математический факультет МГУ получил в распоряжение панорамный стенд виртуальной реальности, оборудованный полусферическим трансфлективным (с обратной проекцией) экраном с радиусом кривизны 3 метра и подвижной платформой с электроприводами и тремя степенями свободы для обеспечения динамической и визуальной имитации (рис. 1).

На этом стенде были испытаны алгоритмы имитации движения колесного транспортного средства [7] и сближения с орбитальной станцией при помощи устройства спасения космонавта [8], основанные на математических моделях, разработанных специалистами механико-математического факультета МГУ и НИИ механики МГУ [9]. Сотрудниками лаборатории МОИДС выполнена реализация в виртуальной среде с динамической имитацией направления гравитоинерциального вектора лунного транспортного средства [10, 11].

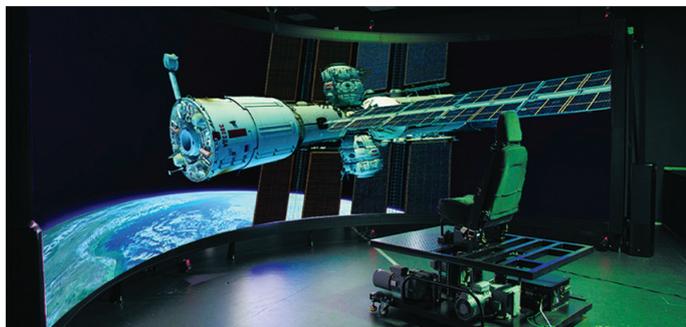


Рис. 1. Панорамная система виртуальной реальности
МГУ имени М.В. Ломоносова

Общая характеристика симулятора НПТС

Симулятор движения колесного транспортного средства по поверхности Луны был создан в 2014 г. в МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках совместного проекта с ООО «Лин Индастриал» [12].

Модель лунного кратера была разработана по данным карты высот (NASA) и фотосъемки поверхности Луны с окололунных беспилотных космических аппаратов. Кратер рядом с горой Малаперт в районе южного полюса был выбран как наиболее предпочтительный для организации лунной базы: 89 % времени в нем светло, продолжительность ночи не более 6 суток, возможно наличие льда в соседних затененных кратерах, прямая видимость Земли, хорошие условия для связи и достаточно ровная поверхность для посадки.

Назначение симулятора – тестирование качества операторской деятельности при управлении НПТС в имитируемых внеземных условиях, оценивание оптимальности управления при свободе выбора траектории, параметров выбранной траектории, степени риска (превышения опасных углов и скоростей), скорости и успешности выполнения задач, времени реакции на неисправности и выполнения теста РДО [13, 29].

Гибкая в плане адаптации и модификации модель транспортного средства была успешно применена для совмещения визуальной и динамической имитации на центрифуге ЦФ-18 движения колесного транспортного средства по лунной поверхности [13] и позволила интегрировать систему оценок качества операторской деятельности в условиях ограничений времени, ресурсов, и определение его функционала при наличии антагонистических факторов и возмущений, вызванных как случайными моделируемыми неисправностями, так и поломками, вызванными грубыми действиями оператора.

Реализация этой модели с визуализацией в шлеме виртуальной реальности Total Vision (Россия) была применена в рамках изоляционных экспериментов Луна-2015, SIRIUS-17, -19, -21 [14] в работе при имитации условий лунной гравитации [15].

Математическая модель колесного транспортного средства

Для движения по поверхности Луны применялись транспортные средства с числом колес от 4 (LRV, США) до 8 («Луноход-1», СССР). В проекте «Луна Семь» (ООО «Лин Индастриал», Россия) был предложен вариант шестиколесных транспортных средств. На его основе были реализованы первые версии симулятора (рис. 2, *а*), которые применялись в экспериментах Луна-2015 и SIRIUS-17. В эксперименте SIRIUS-19 (ИМБП) был реализован четырехколесный вариант транспортного средства (рис. 2, *б*). По данным International Rover Challenge [16] количество четырехколесных схем в разработках все чаще превышает количество шестиколесных. В первую очередь это связано с жесткими ограничениями по массе конструкции ровера (суммарная масса ровера и всех съемных частей в упомянутой работе составляла 85 кг).

Требовалось построить универсальную модель колесного транспорта, способную наиболее точно воспроизводящую как можно большее количество динамических эффектов. При этом должна быть обеспечена ее реализация

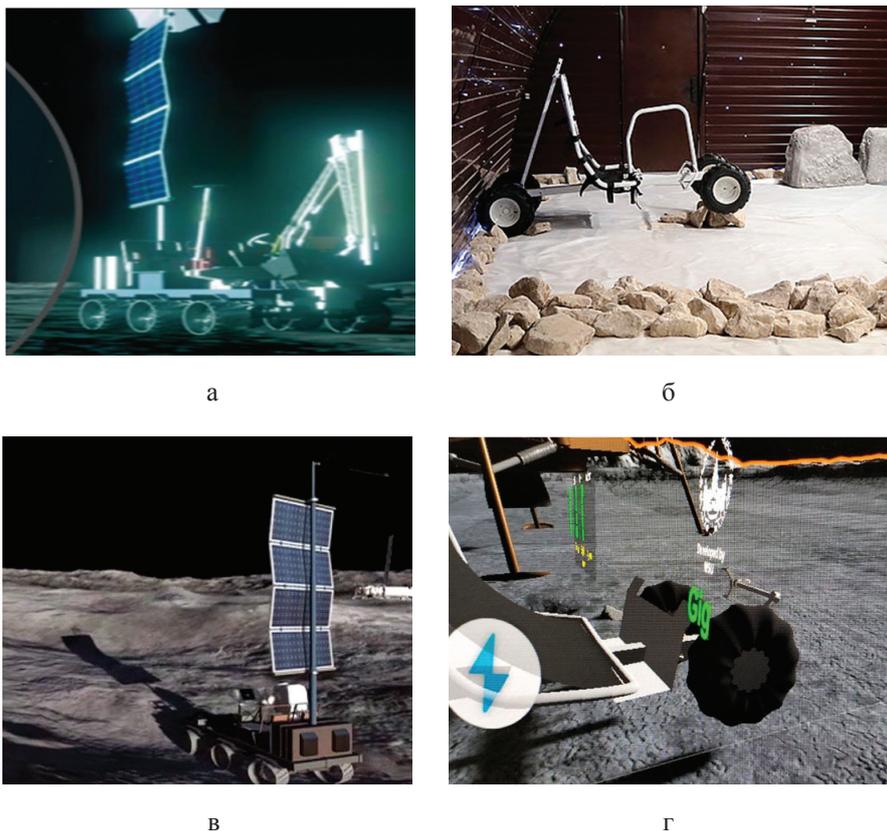


Рис. 2. Внешний облик НПТС:
модели, представленные для разработки симулятора: *а* – 2014 г.; *б* – 2019 г.;
3D-модель в симуляторе версий: *в* – 2014–2017 гг.; *г* – 2019 г.

на компьютере в реальном времени. Также модель должна воспроизводить органы управления, чтобы применять ее в задачах оптимального управления.

Перечисленные требования достаточно сильно ограничивают спектр возможных методов в построении моделей. Например, ввиду требования к универсальности практически невозможно использование методов теории упругости в моделировании поведения колес, а также конечно-элементной модели. В то же время требование к применимости в задачах оптимального управления не позволяет при построении модели пойти по пути детального моделирования трансмиссии – в частности, не рассматривалась реализация коробки переключения передач.

Предложенная модель включает следующие компоненты:

(К) – колеса, которые рассматриваются как несвободные, легкие, инертные тела, модель их сцепления с поверхностью аналогична рассматриваемой в статье [17];

(D) – двигатель и трансмиссия – используется модель, в которой момент, подаваемый двигателем на колеса, является функцией угловой скорости вращения трансмиссии и положения педали ускорения;

(A) – аэродинамическое сопротивление – формируется подобно квадратичной форме вязкого трения;

(O) – корпус колесного транспорта – рассматривается как тяжелое твердое тело;

(P) – подвеска и рельеф – применяется кусочно-линейная модель расчета напряжений в амортизаторах, поверхность предполагается гладкой.

Структурно-функциональная модель симулятора НПТС представлена на рис. 3.

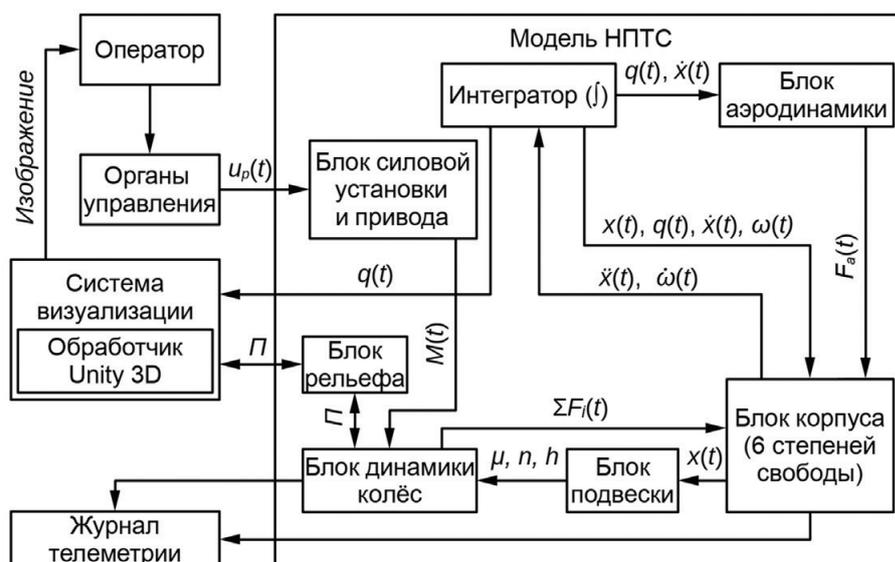


Рис. 3. Структурно-функциональная модель симулятора НПТС

Модель может быть оснащена любым количеством колес (не менее 4). Колеса полностью независимы друг от друга. Так же отдельно не выделяются ведомые и ведущие колеса. В целях упрощения модели принимаются следующие допущения:

- колеса могут перемещаться только вдоль вертикальной оси НПТС, то есть только вдоль прямой, жестко связанной с корпусом;
- точка контакта колеса с поверхностью находится на пересечении колеса и этой прямой;
- колеса считаются достаточно легкими (учитывается, что на очень неровной поверхности данная модель может демонстрировать сильно завышенные параметры сцепления).

Ввиду вышесказанного была принята следующая методика расчета движения колес НПТС. Колесо поворачивается на угол $k_{\alpha,i}^* \tilde{\varphi}$, где $\tilde{\varphi}$ – угол, на который повернут руль, а $k_{\alpha,i}^*$ – передаточный коэффициент i -го колеса (равный нулю, если колесо не должно поворачиваться). Здесь и далее звездочкой помечены константы (скаляры, векторы и тензоры). Органы управления соответственно характеризуются: $\tilde{\varphi}$ – углом отклонения джойстика; \tilde{B} – положением педали тормоза; \tilde{T} – ускорением. При необходимости НПТС может управляться без педалей с помощью двухосевого джойстика.

При условии нахождении колеса на поверхности на своей точке контакта можно рассчитать силу нормальной реакции N_{P_i} поверхности (расчет будет приведен ниже). Если нормальная реакция отрицательна, то считается, что колесо не взаимодействует с землей и, соответственно, не оказывает никакого воздействия на луноход. В противном случае для вычисления продольной и поперечной силы трения используются формулы из работы [7].

Для каждого колеса определяются продольная (x) и поперечная (y) оси – как векторы, параллельные плоскости контакта и либо параллельные (x), либо ортогональные (y) плоскости вращения колеса. Затем определяются величины относительного продольного (s^x) и поперечного (s^y) проскальзывания:

$$s_i^x = \frac{\omega_{K_i} R^* - V_i^x}{|V_i^x|}, s_i^y = \frac{V_i^y}{|V_i^x|}, \quad (1)$$

где ω_{K_i} – угловая скорость вращения i -го колеса;

R^* – радиус i -го колеса;

$V_i^{x,y}$ – скорость пятна контакта i -го колеса.

Сила трения F по закону Амонтона – Кулона будет направлена противоположно вектору скорости проскальзывания, который коллинеарен вектору относительного проскальзывания (s^x, s^y). Определим величину полного проскальзывания s , как длину вектора (s^x, s^y) с углом проскальзывания $\theta_i = \arctan(s^y, s^x)$ и коэффициентом проскальзывания $\Theta = |\sin\theta|$. Тогда формула для модуля силы трения примет следующий вид:

$$|\overline{F_{K_i}}| = kN_{P_i}(c_1^* - c_2^*|\sin\theta_i|) \times \\ \times \sin \left[c_3^* + (c_4^* + c_5^*|\sin\theta_i|) \left[\frac{c_6^*N_{P_i} + c_7^*}{s_i} \right]^{c_8^* - c_9^*|\sin\theta_i|} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где k – коэффициент сухого трения в точке контакта, а c_k^* – некоторые константы. Затем производится расчет угловой скорости колеса:

$$J^* \dot{\omega}_{K_i} = M_{D_i} - (\overline{F_{K_i}}, \overline{e_{x_i}}) R^* - \text{sign} \omega_{K_i} (k_{B,i}^* \tilde{B} + k_{F,i}^*), \quad (3)$$

где J^* – момент инерции колеса;

R^* – радиус колеса;

$\overline{M_{D_i}}$ – момент, поданный от двигателя на колесо;

$\overline{F_{K_i}}$ – продольная сила трения;

\tilde{B} – величина, характеризующая положение педали тормоза;

$k_{B,i}^*$ – соответствующий передаточный коэффициент;

$k_{F,i}^*$ – момент диссипативного трения в подшипниках и трансмиссии.

В работе [7] используется модель двигательной установки и трансмиссии, которая имитирует устройство ровера с вариатором. Считается, что мощность двигателя постоянна и равна P_{avg}^* . Тогда, с учетом работы идеального вариатора и стандартного дифференциала (делящего момент между колесами поровну), момент M_{D_i} будет прямо пропорционален P_{avg}^*/ω_{K_i} . Однако на практике такая модель неприемлема, так как при малой скорости вращения подаваемый момент M_{D_i} стремится к бесконечности. Для корректировки работы модели при малых скоростях вращения вводится ограничение T_{max}^* на максимальный момент. В результате чего формула для M_{D_i} принимает следующий вид:

$$M_{D_i} = \max \left\{ k_{P,i}^* \tilde{T} \frac{P_{avg}^*}{|\omega_{K_i}| + 1}, T_{max}^* \right\}, \quad (4)$$

где $k_{P,i}^*$ – коэффициент, обеспечивающий пропорциональное деление мощности двигателя на все колеса;

ω_{K_i} – величина, характеризующая положение педали газа;

P_{avg}^* – условная мощность двигателя;

T_{max}^* – максимальный момент, который может передать трансмиссия.

Для моделирования работы НПТС в газовой среде имитируется аэродинамическое сопротивление. Примененная аппроксимация аэродинамического сопротивления очень похожа на вычисление кинетического момента в механике. Вводится понятие малого тензора аэродинамического сопротивления J_A^* , который предполагается диагональным в главных осях (его компоненты

означают коэффициенты аэродинамического сопротивления ровера, обтекаемого равномерным потоком воздуха по направлению соответствующих осей). Тем самым сила аэродинамического сопротивления формируется при помощи следующей квадратичной формы (для Луны приравнена к нулю):

$$\overline{F}_A = -J_A^* \dot{\overline{x}}_O |\dot{\overline{x}}_O|. \quad (5)$$

Корпус НПТС – жесткая и относительно тяжелая конструкция, его главные оси инерции направлены стандартным образом. Тогда уравнения Ньютона – Эйлера для корпуса НПТС принимают следующий вид:

$$m_O^* \ddot{\overline{x}}_O = m_O^* \overline{g}^* + \sum_i \overline{F}_{P_i} + \overline{F}_A, \quad J_O^* \dot{\overline{\omega}}_O = [J_O^* \overline{\omega}_O, \overline{\omega}_O] + \sum_i [\overline{r}_{K_i}, \overline{F}_{P_i}], \quad (6)$$

где m_O^* – масса НПТС;

\overline{x}_O – вектор центра масс НПТС;

\overline{g}^* – вектор ускорения свободного падения;

$\sum_i \overline{F}_{P_i}$ – сумма сил, с которой подвеска i -го колеса действует на корпус;

\overline{F}_A – аэродинамическая сила;

J_O^* – тензор инерции НПТС (записанный в главных осях);

$\overline{\omega}_O$ – угловая скорость вращения НПТС в локальных координатах (в главных осях);

\overline{r}_{K_i} – положение центра i -го колеса относительно центра масс НПТС.

Данные уравнения дополняются кинематическими уравнениями в кватернионной записи:

$$\dot{q}_O = \frac{q_O \times \overline{\omega}_O}{2}, \quad (7)$$

где q_O – кватернион, задающий поворот корпуса колесного транспорта;

\times – знак кватернионного умножения.

Рельеф в модели представляет собой непрерывную поверхность, радиус кривизны R каждого участка которой значительно больше радиуса колеса r_i . Для рельефа реализована следующая функция: $\Pi: (\overline{p}_s, \overline{d}_s) \mapsto (\overline{p}, \overline{N}, k)$. Она находит первое пересечение \overline{p} рельефа с лучом, проведенным из данной точки \overline{p}_s в направлении \overline{d}_s , а также определяет вектор нормали \overline{N} и коэффициент сухого трения k в данной точке.

В случае моделирования подвески необходимо определить силу нормальной реакции каждого колеса. Для чего используется следующая модель амортизатора:

$$N_{P_i} = (k_1^* L_i + k_2^* \dot{L}_i) (\overline{e}_z, \overline{e}_{N_i}) \begin{cases} 0, k_1^* L_i + k_2^* \dot{L}_i \leq 0 \\ 1, L_i > L_{\max}^* \\ k_{\max}^*, L_i \leq L_{\max}^* \end{cases}, \quad (8)$$

где L_i – длина амортизатора (точнее, изменение его длины по отношению к недеформированному состоянию);

$(\overline{e_\zeta}, \overline{e_{N_i}})$ – косинус угла между плоскостью колеса и нормалью в данной точке;

k_i^* – константы, определяющие данный амортизатор;

L_{\max}^* – константа, определяющая пробой амортизатора (когда амортизатор сжался больше некоторого предела, тогда сила, с которой он действует, увеличивается в k_{\max}^* раз).

Длина амортизатора и нормаль определяются с помощью функции, которая используется в определении рельефа. Запишем формулы для L_i и \dot{L}_i в предположении, что колесо едет по фиксированному участку поверхности с нормалью $\overline{e_{N_i}}$ и некоторой точкой $\overline{a_i}$

$$L_i = \frac{(\overline{a_i} - \overline{x_O} - \overline{r_i^*}, \overline{e_{N_i}})}{(-\overline{e_\zeta}, \overline{e_{N_i}})} - L_{\text{relax}}^* \quad (9)$$

$$\dot{L}_i = \frac{([\overline{\omega_O}, \overline{r_O^*}] + \dot{\overline{x_O}}, \overline{e_{N_i}})(-\overline{e_\zeta}, \overline{e_{N_i}}) + (\overline{a_i} - \overline{x_O} - \overline{r_O^*}, \overline{e_{N_i}})([\overline{\omega_O}, -\overline{e_\zeta}], \overline{e_{N_i}})}{(-\overline{e_\zeta}, \overline{e_{N_i}})^2} \quad (10)$$

где $\overline{r_i^*}$ – это точка, в которой амортизатор крепится к корпусу.

Тогда полная сила, действующая на транспортное средство со стороны данного колеса, будет представлена следующим образом:

$$\overline{F_{P_i}} = N_{P_i} \overline{e_{N_i}} + \overline{F_{K_i}} \quad (11)$$

Для расширения возможностей тестирования операторской деятельности модель была доработана дистанционно управляемым манипулятором с захватом [17, 18] (см. рис. 2, з; рис. 7).

Подход к графической реализации модели

В программно-аппаратный комплекс входит компьютер с установленным ПО и трехосевой джойстик. По результатам первых сеансов с применением скафандра была добавлена выносная клавиатура для быстрого переключения управления в режим манипулятора (крупные клавиши позволяют использовать ее в том числе в перчатках скафандра).

Симулятор реализован на платформе «Unity 3D», предназначенной для визуализации в реальном времени. По данным, предоставленным разработчиками прототипов НПТС (см. рис. 2, а, б), были созданы две версии 3D-моделей – с колесными формулами 6×6 (см. рис. 2, в) и 4×4 (см. рис. 2, г).

Задача оператора заключается в управлении НПТС с целью последовательного приведения его к трем контрольным точкам (лунным модулям), расположенным, как показано на схеме (рис. 4).

В симуляторе версии 2017 г. задачи выполняются внутри одного кратера (см. рис. 4). В симуляторе версии 2019 г. точка старта, вторая и третья контрольные точки задач размещены внутри кратеров, а первая контрольная точка – на плато (см. рис. 4).

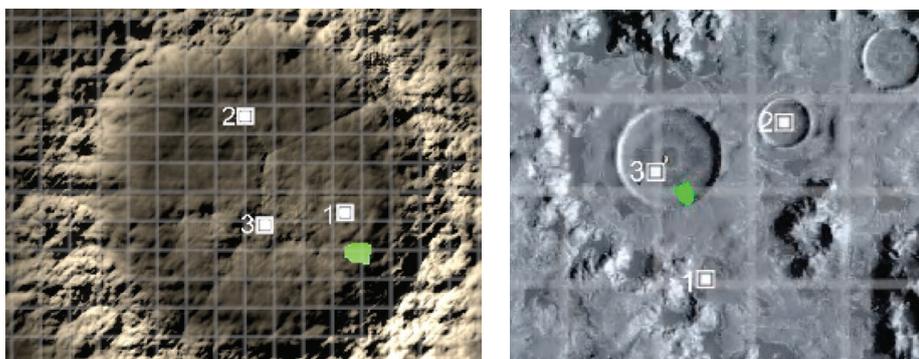


Рис. 4. Расположение трех контрольных точек в симуляторе, версии 2017 г. (слева) и 2019 г. (справа)

Симулятор пригоден и для задач международных экспериментов за счет наличия версий с русским и английским интерфейсом.

Приборная информация, необходимая оператору НПТС, представлена на экране поверх транслируемого основной камерой изображения поверхности, по которой движется НПТС, и видимой части корпуса самого НПТС (рис. 5). Продольный и поперечный углы наклона НПТС относительно гравитационной вертикали отображаются по центру экрана по аналогии с авиагоризонтом и авиационным ИЛС тонкими контрастными линиями зеленого цвета, дополненными контрастными линиями красного цвета, указывающими на границы значений углов наклона, превышение которых при отсутствии своевременных парирующих действий оператора может привести к опрокидыванию НПТС. По аналогии с ИЛС фон выбран прозрачным, что при высоком контрасте линий индикации прибора позволяет сохранить баланс между удобством считывания информации и обзором местности по курсу движения. Информация, регулярное обращение к которой важно на всем протяжении выполнения задания, размещена внизу экрана: время – на прозрачном фоне, а уровни запаса энергии, мощности двигателей и скорости движения объединены полупрозрачным фоном для обеспечения баланса между читаемостью информации и обзорностью местности вблизи НПТС. Окна карты и дополнительной камеры обзора, обращение к которым происходит значительно реже, по аналогии с автомобильным зеркалом заднего вида расположены сверху по краям экрана, что позволяет разгрузить центральную и нижнюю области. При движении НПТС могут возникать различные неисправности, в том числе вызванные действиями оператора. Сообщение о типе неисправности (отказ мотора колеса, навигации, камеры) отображается рядом с индикатором

неисправностей в верхней части (см. рис. 5) с целью разгрузки центральной и нижней частей экрана, а также с целью контроля скорости реакции оператора на события вне области постоянного внимания. Для устранения неисправности необходимо нажать кнопку, указанную в сообщении. Для устранения некоторых неисправностей необходимо выполнить остановку НППТС, о чем указывается в сообщении.

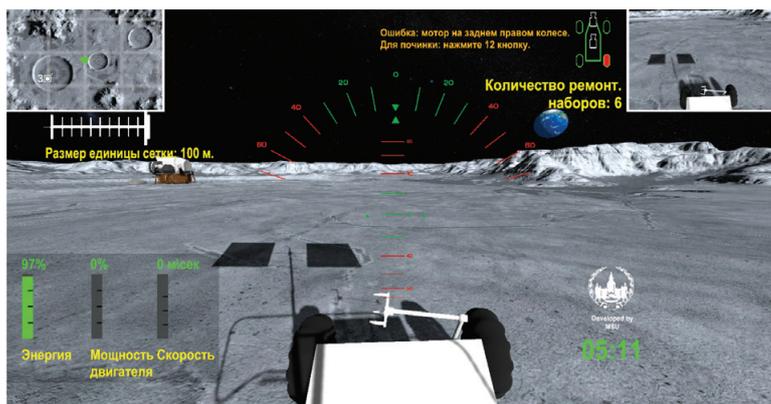


Рис. 5. Отображение неисправности и способа ее устранения

В варианте симулятора для работы в шлеме виртуальной реальности все виртуальные приборы расположены аналогичным образом, находясь в модели на расстоянии одного метра от точки, расположенной посередине между оптическими центрами левого и правого глаза наблюдателя. Для снижения искажений при повороте головы в шлеме все приборы в виртуальной модели сориентированы фронтальной плоскостью в сторону наблюдателя.

При успешном достижении контрольной точки отображается сообщение: «Выполнена задача <номер задачи>». На каждой контрольной точке запускается одно из двух заданий: тест реакции на движущийся объект (рис. 6) или задача сбора образцов (рис. 7). Задача оператора в тесте РДО – отследить и своевременно зафиксировать его с помощью джойстика или клавиатуры.

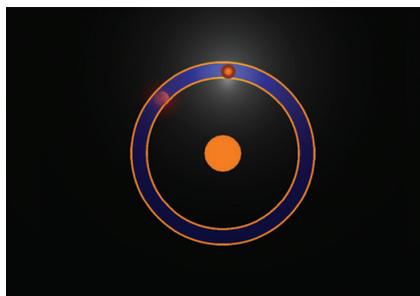


Рис. 6. Окно теста реакции на движущийся объект

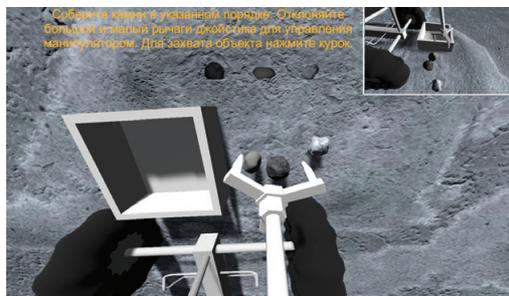


Рис. 7. Сбор образцов

Для сбора образцов грунта необходимо при помощи ручки джойстика (или клавиш курсора клавиатуры) направлять манипулятор на образец в порядке, указанном в верхней части экрана, совместить захват с указанным образцом, поднимая и опуская манипулятор. Затем необходимо переместить образцы в заданную область, используя те же органы управления. При успешном завершении всех задач фиксируются результаты действий оператора: затраченная энергия (%); преодоленное расстояние (м); средняя скорость (м/с); коэффициент качества (безразмерный) шрифтом зеленого цвета и надпись «Миссия выполнена». В случае опрокидывания НПТС, недостатка времени на выполнение операций или досрочном исчерпании энергии выводится результат о невыполнении задачи.

Сбор и автоматическая обработка данных в симуляторе

В процессе выполнения задания оператором производится автоматическая запись:

- 1) координат движения и пути центра масс НПТС (м/с);
- 2) времени управляющего воздействия оператора на органы управления (джойстик) (с);
- 3) углов наклона НПТС по каналам крена и тангажа относительно гравитационной вертикали;
- 4) количества грубых ударов колес о поверхность.

По результатам обработки координат НПТС вычисляется:

- 1) затраченная энергия в процентах от емкости батареи;
- 2) длина траектории (м) – длина кривой, описанной центром масс НПТС при движении;
- 3) преодоленное расстояние (м) – суммарная длина отрезков от каждой контрольной точки (старта или выполненного задания) до точки нахождения транспортного средства при завершении каждого следующего задания;
- 4) средняя скорость (м/с);
- 5) время движения с превышением скорости (с);
- 6) время движения с превышением безопасных значений углов крена и тангажа;
- 7) показатель качества управления Q .

В действующей версии симулятора величина Q рассчитывается один раз в момент останова регистрации. Алгоритм включает три логически связанных этапа:

1. Во время каждого такта в массив добавляются произведения $|\varphi|\Delta t$ и $|\theta|\Delta t$ (углы крена и тангажа), а также суммируется мгновенная скорость v . После завершения заезда эти суммированные данные переводятся в безразмерный вид:

$$\alpha_{\text{roll}} = \frac{\sum|\varphi_i|\Delta t}{\varphi_{\text{max}}}; \quad \alpha_{\text{pitch}} = \frac{\sum|\theta_i|\Delta t}{\theta_{\text{max}}}; \quad \alpha_{\text{speed}} = \frac{|\sum v_i - 0,5V_{\text{max}}N|}{V_{\text{max}}}$$

2. Определяются коэффициенты качества управления (по углам и по скорости) как отношение времени управления с хорошим качеством к общему времени выполнения задания:

$$t_{\text{good},k} = t_{\text{drive}} - t_{\text{bad},k}; K_{t,k} = t_{\text{good},k}/t_{\text{drive}} \leq 1,$$

где $k \in \{\text{roll, pitch, speed}\}$.

3. Вычисляется итоговая величина Q как отношение двух сумм (взвешенная свертка):

$$Q = \frac{\sum_k K_{t,k} \alpha_k}{\sum_k \alpha_k}, 0 \leq Q \leq 1.$$

Можно выделить несколько особенностей такого подхода. При неизменном соблюдении всех ограничений α_k стремятся к нулю и коэффициент качества $K_{t,k} \rightarrow 1$ асимптотически приближается к 1. В то же время нарушения увеличивают соответствующий α_k и одновременно сокращают время «безопасного» управления, что приводит к пропорциональному снижению Q . Вес каждого канала в итоговой оценке автоматически масштабируется величиной собственных отклонений, поэтому даже кратковременные, но крупные превышения углов или скорости отражаются заметнее, чем длительные, но незначительные отклонения.

Методика применения симулятора на тренажерном комплексе «Выход-2»

С использованием симулятора НПТС на тренажерном комплексе «Выход-2» (рис. 8) с космонавтами РС МКС в рамках эксперимента «Созвездие» были проведены до- и послеполетные эксперименты. Применялась адаптированная для экрана портативного компьютера версия программно-аппаратного комплекса симулятора лунохода.

После возвращения из долговременного космического полета сеансы экспериментов проводились на 4-е сутки. Они состояли из короткой ознакомительно-тренировочной сессии, проводившейся без использования скафандров и системы обезвешивания, и сеанса управления виртуальной моделью лунохода в скафандре «Орлан» с обезвешиванием (рис. 9), имитирующим условия работы в поле действия силы притяжения на поверхности Луны (15 мин). В рамках каждого сеанса космонавты в среднем предпринимали до 3 попыток выполнения задачи. Управление НПТС проводилось после выполнения типовых операций ВКД, моделируемых в эксперименте.

В рамках успешного прохождения миссии космонавты затрачивали на выполнение задачи в среднем 400–500 с; длина пройденной траектории составляла 1300 м; средняя скорость – 1,4 м/с; затраты заряда батарей лунохода – 38 %; число столкновений с препятствиями – 1.



Рис. 8. Космонавт управляет симулятором НПТС



Рис. 9. Симулятор НПТС при работе на тренажерном комплексе «Выход-2»

В ходе эксперимента регистрировались параметры выполнения подзадач: зрительно-моторная реакция на имитируемые неисправности, РДО, распознавание образов (на примере сбора грунта манипулятором).

Время простой зрительно-моторной реакции составляло от 0,2 до 11 с. Время реакции, превышающее 1 с, как правило, было связано с тем, что оператор не своевременно обращал внимание на соответствующую сигнализацию. При первых предъявлениях РДО значительная часть результатов были ошибочными, при повторных – точность возрастала до 98–99 %.

Основные критические ошибки управления, приводившие к преждевременному завершению задачи, были связаны с опрокидыванием ровера при превышении допустимых углов крена/тангажа (например, при форсировании крутых склонов) или с наездом на препятствия на высокой скорости.

У космонавтов, участвовавших в эксперименте, можно выделить два основных стиля операторской деятельности: рискованный и осторожный, в целом соответствующие ранее описанным «поисковому» и «контролирующему» стилям деятельности, зависящим от личностных особенностей оператора [19]. В данных стилях управления различались скорость движения лунохода (в среднем около 1,8 и 1,2 м/с соответственно), время управления с превышением рекомендованной скорости и углов крена/тангажа (до 20–25 % от общего времени управления в случае рискованного стиля). Рискованный стиль управления позволял выполнить задачу быстрее, однако при этом возрастала вероятность критических ошибок. При избыточно осторожном стиле управления был выше риск срыва миссии ввиду истечения отведенного на задачу времени.

Выполнение работы в скафандре типа «Орлан» сказывалось на качестве деятельности. В частности, было показано, что нештатные ситуации при выполнении методики могут быть связаны с тем, что космонавт не чувствует нажатие на кнопки и угол отклонения джойстика. При проведении экспериментальных сеансов по данной методике установлено, что на качество операторской деятельности оказывает существенное влияние величина рабочего давления в скафандре. Перчатка скафандра также может осложнять деятель-

ность ввиду затруднения нажатия на кнопки и клавиши с относительно небольшими размерами и ходом.

Однако следует отметить, что при выполнении задачи в скафандре на тренажерном комплексе «Выход-2» (имитация ВКД), несмотря на неблагоприятные воздействующие факторы, космонавты в среднем выполняли деятельность более качественно, чем в ознакомительном сеансе. Отмечалась лучшая фокусировка внимания на выполняемой задаче, повышенная мотивация к успешному завершению миссии.

В 2021 г. было проведено специальное исследование с применением симулятора, направленное на изучение характеристик операторской деятельности при управлении виртуальным луноходом в условиях моделируемой лунной гравитации [15]. Четыре испытуемых прошли двухнедельную ортостатическую гипокинезию для имитации физиологических эффектов лунной гравитации. Исследование показало снижение эффективности управления виртуальным луноходом, изменения в работе сердечно-дыхательной системы операторов и тенденцию к более осторожному управлению. Выявлены индивидуальные различия в адаптации к условиям эксперимента, что подтверждает необходимость персонализированного подхода к подготовке космонавтов для работы в условиях пониженной гравитации.

Применение симулятора в международных изоляционных экспериментах серии SIRIUS позволило получить уникальные данные о психофизиологических аспектах управления луноходом в условиях, приближенных к реальным миссиям. Анализ внешней коммуникации экипажа показал значительное временное увеличение объема взаимодействий с Центром управления полетами именно в период симуляции высадки на лунную поверхность, что подтверждает повышенную когнитивную нагрузку при выполнении этих задач [20]. В эксперименте «ЭСКИЗ» отмечалось снижение ситуативной тревожности у всех членов экипажа в период интенсивных «высадок на поверхность Луны» [21]. Помимо этого, по результатам протоколов ВКД отмечено увеличение позитивных эмоций в контенте переговоров между членами экипажа высадки и оператором, оставшимся в спускаемом модуле во время выполнения профессиональной операторской деятельности.

Данный вывод получил дальнейшее подтверждение в работе [22], где в период симуляции высадки на лунную поверхность наблюдалось увеличение позитивных лицевых выражений и повышение интенсивности деятельности при одновременном снижении проявлений стресса. Это свидетельствует о том, что экипаж адаптировался к сложным задачам в мотивированной и вовлеченной манере, что подчеркивает положительную динамику процесса адаптации в условиях лунной миссии.

Сравнение с аналогами

Рассматриваемый симулятор позволяет проводить исследование задач в интересах оптимального управления НПТС при свободе выбора траектории

движения, оценивать время и качество ее прохождения, степень риска (превышение опасных углов и скоростей). Можно проводить тесты на реакцию и скорость выполнения задачи управления манипулятором.

Результаты проведенной оценки качества операторской деятельности могут быть применены для определения психофизиологического состояния оператора, в том числе на борту орбитальной космической станции с целью принятия решения о выборе наиболее готового из состава экипажа к выполнению ответственной задачи (ручное управление стыковкой, выход в открытый космос и т. п.).

Симулятор позволяет осуществлять:

- исследование навыков управления движением в различных условиях (при имитации разных значений силы тяжести, по разным поверхностям, в разных средах);

- исследование особенностей движений испытателя в скафандре, совершенствование эргономических характеристик перспективных транспортных средств;

- оценку влияния гальванической стимуляции вестибулярного аппарата [23] на качество операторской деятельности при выполнении управления луноходом в статике и при динамической имитации поездки по Луне, а также при динамической имитации сенсорного конфликта невесомости на ЦФ-18 при сквозном моделировании космического полета [6];

- тестирование качества управления при имитации задержек телеуправления.

За последние годы созданы несколько симуляторов, предназначенных для отработки управления лунными и марсианскими роверами. Наиболее значимым является LTV NASA – комплекс «driver-in-the-loop» с цилиндрическим экраном и подвижной платформой с 6 степенями свободы, ориентированный на подготовку астронавтов программы «Artemis» и отладку конструкции ровера [24]. Параллельно компания GM совместно с Lockheed Martin адаптировала автоспортивный стенд для виртуального тест-драйва коммерческого Lunar Mobility Vehicle. Инженерный упор на подвеску, сцепление колес и энергоэффективность позволили ускорить цикл проектирования вне дорогостоящих полигонных испытаний [25]. Для марсианских миссий NASA развивает открытое VR-окружение Mars XR OSS на платформе Unreal Engine 5, где пользователи создают сценарии ВКД, обеспечивая вождение марсохода без громоздкой механической платформы, что дает масштабируемый инструмент для обучения и исследований [26].

Сравнение показывает, что отечественный симулятор МГУ/ИМБП/НИИ ЦПК сочетает сильные стороны упомянутых решений: в первую очередь стереовизуализацию и подвижную платформу, подобную LTV NASA. Однако отечественный симулятор является единственным из рассматриваемых комплексов системно применяемым с учетом влияния физиологических

факторов (вестибулярная стимуляция, работа в скафандре, интеграция с центрифугой и др.) [14, 21, 28, 29].

Российский симулятор по уровню иммерсивности и научно-практической направленности вполне конкурентоспособен с зарубежными аналогами. Его дальнейшее развитие должно опираться на лучшие практики: расширение открытых VR-сценариев (по примеру Mars XR OSS) в целях увеличения библиотеки задач и применение методов виртуального «цифрового полигона» GM/Lockheed для быстрого сопоставления математической модели с ходовыми испытаниями прототипов.

Выводы

В работе обобщены результаты создания и применения имитационного комплекса, воспроизводящего основные особенности управления колесным напланетным транспортным средством в условиях пониженной гравитации. Разработанная математическая модель позволяет адекватно описывать движение лунохода, и обеспечивает достаточную для восприятия человеком реалистичность.

Экспериментальное применение симулятора в ходе послеполетных исследований продемонстрировало значимость индивидуальных стилей управления. Установлено, что такие стили можно объективно охарактеризовать показателями качества управления, включающими скорость движения, время пребывания в опасных зонах крена и тангажа, а также оптимальность траектории. Объективность оценки подтверждается ранее описанным в литературе «поисковым» и «контролирующим» типам деятельности операторов.

Симулятор проверен в условиях длительной изоляции операторов. Сделаны выводы о влиянии работы с симулятором лунохода в комбинации с имитацией ВКД на коммуникативные способности. В другом эксперименте в условиях имитируемой лунной гравитации показана зависимость между эффективностью управления виртуальным луноходом и изменениями в работе сердечно-дыхательной системы операторов, что говорит о необходимости комплексного учета физиологических параметров при планировании миссий. Комбинирование симулятора с центрифугой ЦФ-18, применение методов гальванической вестибулярной стимуляции и проведение работ в скафандре типа «Орлан» показали принципиальную возможность воспроизведения критических условий деятельности операторов НПТС.

Дальнейшие исследования планируется вести по следующим направлениям:

1. При помощи симулятора НПТС выполнить эргономические исследования манипуляторов и инструментов тренажера, принципов управления и визуализации приборов, обстановки, транспорта.
2. Провести исследования адекватности моделей различных НПТС, взаимодействуя с разработчиками прототипов. Для этого в параметрах

математической модели предусмотреть реальные условия испытаний прототипа (на прототип устанавливаются инерциальные датчики, проводится поездка по одинаковому маршруту) и его виртуальной реализации; выполнять сравнительный анализ траектории, скорость и качества выполнения операций.

3. Разработать методы оценки и интерпретации результатов операторской деятельности на основе существующих методик отбора и подготовки космонавтов и применения максимального тестирования [27] качества операторской деятельности.

4. Разработать методику действий при имитируемых неисправностях в соответствии с их реализацией на прототипах НПТС.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ВКД	внекорабельная деятельность
ГВС	гальваническая вестибулярная стимуляция
ИЛС	индикатор на лобовом стекле
ИМБП	Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук
МГУ	Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
МОИДС	лаборатория математического обеспечения имитационных динамических систем МГУ
НПТС	напланетное пилотируемое транспортное средство
ПК	персональный компьютер
ПО	программное обеспечение
РДО	реакция на движущийся объект
НИИ ЦПК	ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина»
LTV	Lunar Terrain Vehicle (симулятор предназначенный для отработки управления лунными и марсианскими роверами)
LRV	Lunar Roving Vehicle (лунное транспортное средство)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства)
VR	virtual reality (виртуальная реальность)

ЛИТЕРАТУРА

1. К проекту освоения Луны: некоторые инженерно-психологические и медицинские проблемы / И.Б. Ушаков, Ю.А. Бубеев, В.И. Гушин, Я.С. Боритко // Космическая техника и технологии. – 2015. – № 3(10). – С. 68–80.
2. Оценка функциональных возможностей экипажа при выполнении внекорабельной деятельности после длительной изоляции в наземной модели космической станции / А.А. Савеко, А.И. Нетреба, Д.М. Швед, А.В. Шпаков [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2023. – Т. 57, № 6. – С. 18–27.
3. Довгань, В.Г. Страницы истории управления луноходом (к 50-летию создания экипажа лунохода) // Идеи и новации. – 2018. – Т. 6, № 3. – С. 29–45.
4. Morea, Saverio F. “The Lunar Roving Vehicle – Historical Perspective”. Proc. 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities, 5–7 April, 1988 // NASA Conference Publications. – 1992. – Vol. 1. – P. 619–632.

5. Математическое моделирование физиологических систем и динамическая имитация сенсорного конфликта невесомости / В.А. Садовничий, В.В. Александров, Т.Б. Александрова, Т.Г. Астахова [и др.] // *Фундаментальная и прикладная математика*. – 1997. – Т. 3, Вып. 1. – С. 129–147.
6. Садовничий, В.А. Математические задачи динамической имитации полета / В.А. Садовничий, В.В. Александров, О.Д. Чугунов // Москва: Издательство МГУ, 1986. – 181 с.
7. Модель движения автомобиля как основа математического обеспечения тренажерного комплекса водителя / И.В. Новожилов, П.А. Кручинин, А.В. Лебедев [и др.] // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. – № 6. – С. 31–36.
8. Афанасьев, И. Персональный транспорт космонавта / И. Афанасьев, Д. Воронцов // *Вокруг света*. – 2010. – № 6. – С. 114–120.
9. Новые задачи физико-математического практикума. Часть II. Тестирование качества сближения устройства спасения космонавта с Международной космической станцией / В.В. Александров, Д.И. Бугров, С.С. Лемак [и др.]. – Москва: Издательство попечительского совета механико-математического ф-та МГУ, 2015. – 56 с.
10. Бурлаков, Д.С. Математическая модель планетохода / Д.С. Бурлаков, В.А. Чертополохов // Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – Звездный городок: НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина, 2023. – С. 245–247.
11. Программное обеспечение имитатора персонально управляемого колесного транспорта / В.А. Чертополохов, Д.С. Бурлаков, А.В. Лебедев // Свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение. – № 2016619103 от 12 августа 2016 г.
12. Предложение по созданию российской лунной базы «Луна Семь» / Лин Индастриал: [сайт]. – 2019. – URL: <https://spacelin.ru/luna-sem/prezentatsiya/> (дата обращения: 27.03.2025).
13. Экспериментальные исследования возможности применения систем виртуальной реальности при моделировании на центрифуге управляемого движения лунохода / П.П. Долгов, В.Н. Киршанов, Е.Ю. Иродов [и др.] // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2020. – № 3(36). – С. 91–108.
14. Белаковский, М.С. Наземные эксперименты – через МКС – к дальнему космосу / М.С. Белаковский, О.В. Волошин, А.В. Суворов // *Международный научный проект SIRIUS*. – Москва: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2018. – 19 с.
15. Characteristics of Operator Performance in Controlling a Virtual Lunar Rover During Simulated Lunar Gravity / E.P. Khudyakova, V.A. Sedelkova, G.G. Tarasenkov [et al.] // *XLIV Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration*. – Moscow, 2020. – P. 457–462. – Text is electronic // AIP Publishing: [webseit]. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5003143> (date of access 03/27/2025).
16. International Rover Challenge // *Roverchallenge.org*: [webseit]. – 2025. – URL: <https://roverchallenge.org/irc/> (дата обращения: 15.11.2024).
17. Moon Landing Simulation Methodology, Construction of the Wheeled Robot and Arm Manipulator Remote Control Model / M.D. Belousova, V.A. Chertopolokhov, A.P. Kruchinina [et al.] // *22nd IAA Humans in Space Symposium Proceedings*. – United Arab Emirates: International Academy of Astronautics Dubai, 2019. – 27 p.
18. Белоусова, М.Д. Программный модуль для тестирования оператора лунного ровера с двухзвенным роботом-манипулятором. Свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение № 2023666999 от 9 августа 2023 года.
19. Взаимосвязь личностно-обусловленных индивидуальных устойчивых поведенческих стилей с качеством и надежностью профессиональной операторской деятельности / А.В. Дудукин, В.П. Сальницкий, Я.С. Боритко, В.И. Гушин [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина* – 2013. – Т. 47, № 3. – С. 10–19.

20. External Communication of Autonomous Crews Under Simulation of Interplanetary Missions / N. Supolkina, A. Yusupova, D. Shved, V. Gushin. – DOI: 10.3389/fphys.2021.751170 // *Frontiers in Physiology*. – 2021. – Vol. 12. – Art. 751170.
21. Лебедева, С.А. Изучение когнитивной работоспособности и психофизиологического состояния человека-оператора в условиях изоляции / С.А. Лебедева, Д.М. Швед // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2022. – Т. 62, № 4. – С. 225–231.
22. Tafforin, C. 120-day Simulation of a Moon Mission (SIRIUS-19): Context of Behavioral Occurrences / C. Tafforin. – DOI: 10.22330/he/37/008-015 // *Human Ethology*. – 2022. – Vol. 37. – P. 8–15.
23. Гальваническая коррекция нейронного управления установкой взора. Часть 2 / В.А. Садовничий, В.В. Александров, Х.Л. Гордильо-Домингuez [и др.]. – DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-5-5 // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. – 2024. – № 5. – С. 47–53.
24. Developing a Motion-Based System for Lunar Vehicle Handling Qualities Testing / H.L. Litaker [et al.] // 2024 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. – 2024. – P. 1–22.
25. GM and Lockheed Martin’s Lunar Rover Virtual Drive: Easier Than Moonwalking. // *Ansible Motion Himibed*: [webseit]. – URL: <https://www.ansiblemotion.com/ansible-motion-automotive-driver-in-the-loop-simulation-news/gm-and-lockheed-martins-lunar-rover-virtual-drive-easier-than-moonwalking> (дата обращения: 25.05.2025).
26. NASA Mars XR Operations Support System Challenge // *HeroX*: [webseit]. – 2022. – URL: <https://www.herox.com/MarsXR> (дата обращения: 20.05.2025).
27. Смешанные стратегии в задаче максиминного тестирования качества робастной стабилизации / В.А. Садовничий, В.В. Александров, А.В. Лебедев, С.С. Лемак // *Дифференциальные уравнения*. – 2009. – Т. 45, № 12. – С. 1787–1793.
28. Использование графоаналитических методов для составления дорожных карт и определения контрольных точек на маршрутах луноходов для отслеживания космонавтами точности позиционирования по навигационным маякам / М.М. Князьков, М.В. Михайлюк, Б.И. Крючков, В.А. Довженко [и др.] // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2024. – № 2(51). – С. 120–144.
29. Построение исследовательского стенда для психофизиологического тестирования интерактивного взаимодействия человека-оператора с визуальной средой / В.В. Александров, Б.В. Бурдин, Б.И. Крючков, В.М. Усов [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина. XVI Конференция по космической биологии и медицине с международным участием, школа молодых ученых*. – 2016. – Т. 50, № 5, спецвыпуск. – 6 с.

REFERENCES

1. On the Lunar Exploration Project: Some Engineering, Psychological and Medical Problems / I.B. Ushakov, Yu.A. Bubeev, V.I. Gushchin, Ya.S. Boritko // *Space Equipment and Technologies*. – 2015. – No 3(10). – P. 68–80.
2. Evaluation of the Functional Capabilities of the Crew When Performing Extravehicular Activities After Long-Term Isolation in a Ground-Based Model of a Space Station / A.A. Saveko, A.I. Ntreba, D.M. Shved, A.V. Shpakov [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2023. – Vol. 57, No 6. – P. 18–27.
3. Dovgan, V.G. Pages of the History of Lunar Rover Control (on the 50th Anniversary of the Creation of the Lunar Rover Crew) // *Ideas and Innovations*. – 2018. – Vol. 6, No 3. – P. 29–45.
4. Morea, Saverio F. “The Lunar Roving Vehicle – Historical Perspective”. *Proc. 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities, 5–7 April, 1988* // *NASA Conference Publications*. – 1992. – Vol. 1. – P. 619–632.
5. Mathematical Modeling of Physiological Systems and Dynamic Imitation of Sensory Conflict in Zero Gravity / V.A. Sadovnichy, V.V. Aleksandrov, T.B. Aleksandrova, T.G. Astakhova [et al.] // *Fundamental and Applied Mathematics*. – 1997. – Vol. 3, Issue. 1. – P. 129–147.

6. Sadovnichy, V.A. *Mathematical Problems of Dynamic Flight Imitation* / V.A. Sadovnichy, V.V. Aleksandrov, O.D. Chugunov // Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1986. – 181 p.
7. *Vehicle Motion Model as a Basis for Mathematical Support of the Driver's Training Complex* / I.V. Novozhilov, P.A. Kruchinin, A.V. Lebedev [et al.] // *Mechatronics, Automation, Control*. – 2007. – No 6. – P. 31–36.
8. Afanasyev, I. *Personal Transport of the Cosmonaut* / I. Afanasyev, D. Vorontsov // *Around the world*. – 2010. – No 6. – P. 114–120.
9. *New Problems of Physical and Mathematical Practical Training. Part II. Testing the Quality of Approach of the Cosmonaut Rescue Device to the International Space Station* / V.V. Alexandrov, D.I. Bugrov, S.S. Lemak [et al.]. – Moscow: Publishing House of the Board of Trustees of the Faculty of Mechanics and Mathematics of Moscow State University, 2015. – 56 p.
10. Burlakov, D.S. *Mathematical Model of the Rover* / D.S. Burlakov, V.A. Chertopolokhov // *Collection of Materials of the XV International Scientific and Practical Conference "Manned Spaceflight"*. – Yu.A. Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center, Star City: 2023. – P. 245–247.
11. *Software for a Simulator of a Personally Controlled Wheeled Vehicle* / V.A. Chertopolokhov, D.S. Burlakov, A.V. Lebedev // *Certificate of Registration of Rights to Software*. – No 2016619103 dated August 12, 2016.
12. *Proposal for the Creation of a Russian Lunar Base "Luna Seven"* / Lin Industrial LLC: [webseit]. – 2019. – URL: <https://spacelin.ru/luna-sem/prezentatsiya/> (date of access 03/27/2025).
13. *Experimental Studies of the Possibility of Using Virtual Reality Systems in Simulating the Controlled Motion of a Lunar Rover on a Centrifuge* / P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov, E.Yu. Irodov [et al.] // *Manned Spaceflight*. – 2020. – No 3(36). – P. 91–108.
14. Belakovsky, M.S. *Ground Experiments – Via the ISS – to Deep Space* / M.S. Belakovsky, O.V. Voloshin, A.V. Suvorov // *International Scientific Project SIRIUS*. – Moscow: SSC RF – IBMP RAS, 2018. – 19 p.
15. *Characteristics of Operator Performance in Controlling a Virtual Lunar Rover During Simulated Lunar Gravity* / E.P. Khudyakova, V.A. Sedelkova, G.G. Tarasenkov [et al.] // *XLIV Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration*. – Moscow, 2020. – P. 457–462. – Text is electronic // AIP Publishing: [webseit]. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.20003143> (date of access 03/27/2025).
16. *International Rover Challenge* // *Roverchallenge.org*: [webseit]. – 2025. – URL: <https://roverchallenge.org/irc/> (date of access 11/15/2024).
17. *Moon Landing Simulation Methodology, Construction of the Wheeled Robot and Arm Manipulator Remote Control Model* / M.D. Belousova, V.A. Chertopolokhov, A.P. Kruchinina [et al.] // *22nd IAA Humans in Space Symposium Proceedings*. – United Arab Emirates: International Academy of Astronautics Dubai, 2019. – 27 p.
18. Belousova, M.D. *Software Module for Testing the Operator of a Lunar Rover With a Two-Link Robotic Manipulator*. *Certificate of Registration of Rights to Software No 2023666999* dated August 9, 2023.
19. *The Relationship Between Personality-Dependent Individual Stable Behavioral Styles and the Quality and Reliability of Professional Operator Activity* / A.V. Dudukin, V.P. Salnitsky, Ya.S. Boritko, V.I. Gushchin [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2013. – Vol. 47, No 3. – P. 10–19.
20. *External Communication of Autonomous Crews Under Simulation of Interplanetary Missions* / N. Supolkina, A. Yusupova, D. Shved, V. Gushin [et al.]. – DOI: 10.3389/fphys.2021.751170 // *Frontiers in Physiology*. – 2021. – Vol. 12. – Art. 751170.
21. Lebedeva, S.A. *Study of Cognitive Performance and Psychophysiological State of a Human Operator in Isolation* / S.A. Lebedeva, D.M. Shved // *Occupational Medicine and Industrial Ecology*. – 2022. – Vol. 62, No 4. – P. 225–231.

22. Tafforin, C. 120-day Simulation of a Moon Mission (SIRIUS-19): Context of Behavioral Occurrences / C. Tafforin. – DOI: 10.22330/he/37/008-015 // *Human Ethology*. – 2022. – Vol. 37. – P. 8–15.
23. Galvanic Correction of Neural Control of Gaze Setting. Part 2 / V.A. Sadovnichy, V.V. Aleksandrov, J.L. Gordillo-Dominguez [et al.]. – DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-5-5 // *Bulletin of Moscow University. Series 1: Mathematics. Mechanics*. – 2024. – No 5. – P. 47–53.
24. Developing a Motion-Based System for Lunar Vehicle Handling Qualities Testing / H.L. Litaker [et al.] // 2024 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. – 2024. – P. 1–22.
25. GM and Lockheed Martin’s Lunar Rover Virtual Drive: Easier Than Moonwalking // *Ansible Motion* Himibed: [webseit]. – URL: <https://www.ansiblemotion.com/ansible-motion-automotive-driver-in-the-loop-simulation-news/gm-and-lockheed-martins-lunar-rover-virtual-drive-easier-than-moonwalking> (date of access: 25.05.2025).
26. NASA Mars XR Operations Support System Challenge // *HeroX*: [webseit]. – 2022. – URL: <https://www.herox.com/MarsXR> (date of access 05/20/2025).
27. Mixed Strategies in the Problem of Maximin Testing of the Quality of Robust Stabilization / V.A. Sadovnichy, V.V. Aleksandrov, A.V. Lebedev, S.S. Lemak // *Differential Equations*. – 2009. – Vol. 45, No 12. – P. 1787–1793.
28. Use of Graph Analytic Techniques for Roadmapping and Marking the Control Points on the Lunar Rover’s Routes for Cosmonauts to Track the Positioning Accuracy by Navigation Beacons / M.M. Knyazkov, M.V. Mikhailyuk, B.I. Kryuchkov, V.A. Dovzhenko [et al.] // *Manned Spaseflight*. – 2024. – No 2(51). – P. 120–144.
29. Construction of a Research Stand for Psychophysiological Testing of Interactive Interaction of a Human Operator With a Visual Environment / V.V. Alexandrov, B.V. Burdin, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine. XVI Conference on Space Biology and Medicine with International Participation, School of Young Scientists*. – 2016. – Vol. 50, No 5, Special issue. – 6 p.