

УДК 611.738:611.09

**ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕНА
МОДЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ВКД НА ПОВЕРХНОСТИ
ПОСЛЕ ПЕРЕЛЕТА К ЛУНЕ И МАРСУ****Е.В. Фомина, Б.И. Крючков, М.М. Харламов, А.А. Мисуркин,
А.П. Гришин, П.П. Долгов, П.В. Романов, Т.Б. Кукоба**

Докт. биол. наук Е.В. Фомина; П.В. Романов (ГНЦ РФ – ИМБП РАН)
Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. экон. наук М.М. Харламов;
Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации
А.А. Мисуркин; А.П. Гришин; канд. техн. наук П.П. Долгов;
канд. пед. наук Т.Б. Кукоба (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлены результаты сравнительного оценивания изменений в гравитационно-зависимых физиологических системах при выполнении космонавтами модельных задач на поверхности планеты после полетов различной продолжительности. Сопоставляются параметры рабочих операций в скафандре и без скафандра при выполнении космонавтом типовых задач ВКД с результатами изменений мышечной силы. Обсуждается влияние профилактических мероприятий на функциональные возможности сердечно-сосудистой системы в длительных и кратковременных полетах с учетом особенностей ВКД. На основе материалов модельных до- и послеполетных экспериментов с участием космонавтов РС МКС дается прогноз успешности ВКД на Луне.

Ключевые слова: космонавт, невесомость, сила мышц ног, нервно-мышечная система, внекорабельная деятельность, скафандр, операторские задачи, физическая работоспособность

**Physiological Penalty of EVA Simulative Missions on the Moon
and Mars Surface. E.V. Fomina, B.I. Kryuchkov, M.M. Kharlamov,
A.A. Misurkin, A.P. Grishin, P.P. Dolgov, P.V. Romanov,
T.B. Kukoba**

The article presents results of comparative assessment of changes in gravity-dependent physiological systems of cosmonauts when performing model tasks on the planet surface after completing various-duration flights. The parameters of suited and non-suited operations when cosmonaut performs typical EVA tasks are compared with the results of changes in muscle strength. The effect of preventive measures on functionality of cardiovascular system in long and short-term flights is discussed taking into account EVA features. The success of performing an EVA on the Moon surface is predicted based on the materials of modeling pre- and post-flight experiments with participation of cosmonauts aboard ISS RS.

Keywords: cosmonaut, weightlessness, leg muscle strength, neuromuscular system, extravehicular activity, spacesuit, operator tasks, physical workability

Введение

Космонавтика готовится к переходу от орбитальных полетов к исследованию тел Солнечной системы. Профилактика негативных последствий пребывания в невесомости занимает важное место среди других проблем гравитационной физиологии. Невесомость рассматривается как специфический раздражитель, действующий на организм человека в течение всего полета. Ответом на этот стимул являются адаптивные процессы в органах и тканях. Длительное пребывание в невесомости сопровождается выраженными изменениями в системах организма, определяющих физическую работоспособность. Основным воздействием невесомости на опорно-двигательный аппарат является снятие весовой нагрузки и, как следствие, общая астенизация организма, потеря мышечной массы, снижение силы, выносливости и физической работоспособности. Невесомость влияет на баланс жидкости в организме, вызывая изменение состава крови, снижение минеральной плотности костей. Изучение адаптационных процессов помогает разработать мероприятия, направленные на противодействие развитию этих процессов.

Очевидно, что в первую очередь при подготовке к межпланетным путешествиям необходимо учитывать уроки, извлеченные из полетов продолжительностью, сопоставимой с полетом на Марс, соответственно, это сверхдальние полеты [1]. Однако опыт шестимесячных полетов также может быть интересен, поскольку быстрое развитие современных технологий предполагает возможность достижения поверхности Марса за сопоставимое время [2]. Необходимо использовать каждый полет на МКС для накопления знаний о возможности противодействия негативным последствиям невесомости [3].

Согласно современному сценарию освоения Марса, предполагается этап создания лунных баз и орбитальных лунных станций. Решение этой проблемы требует ответа на вопрос о целесообразности противодействия негативным последствиям невесомости в полетах, сравнимых с полетом на Луну. В настоящее время выполняются, в основном, полугодовые миссии. В связи с этим необходим детальный анализ каждого короткого полета, чтобы предсказать успех ВКД на поверхности Луны.

Общая продолжительность полетов, совершенных на Луну в рамках программы «Аполлон» (НАСА, США), варьировалась от 8,1 до 12,6 суток. Время пребывания астронавтов НАСА на Луне (суммарное время выходов на лунную поверхность за экспедицию) составило от 22,2 до 75 часов. Даже такое относительно короткое воздействие факторов космического полета вызвало изменения в функциях физиологических систем организма. Наблюдались снижение физической работоспособности, ортостатической устойчивости, вестибулярные расстройства, потеря веса, повышенная секреция гормонов надпочечников, обезвоживание, уменьшение объема эритроцитов, плазмы крови и другие изменения [4]. Кроме того, были зафиксированы отсроченные негативные последствия для состояния здоровья участников программы «Аполлон» [5].

ВКД на Луне имеет специфические особенности, которые отличают ее от ВКД на околоземной орбите или, тем более, от активности в условиях земной гравитации. К таким особенностям относятся гравитация, составляющая 1/6 земной, работа в скафандре, сложный для передвижения рельеф поверхности Луны, низкая освещенность, токсичная пыль, значительные перепады температур, большая продолжительность дня и ночи. Эксперименты по моделированию лунной гравитации на борту самолета показали увеличение времени на выполнение различных операций до 120 %. В модели лунного скафандра время работы увеличивается в среднем в 2,5 раза [6, 7].

Следует учитывать, что космонавты будут выполнять ВКД после пребывания в невесомости в течение нескольких дней во время полета с Земли на Луну. Во время полета на Марс продолжительность воздействия неблагоприятных факторов невесомости будет увеличена до одного года. Продолжительность пребывания и выполнения работ во время посадки на инопланетную поверхность будет значительно увеличена по сравнению с продолжительностью миссий программы «Аполлон».

В настоящее время накоплен достаточный материал об индивидуальных особенностях адаптации организма к невесомости и высокой вариабельности уровня физической работоспособности после завершения шестимесячных полетов [8]. В связи с этим интересно сравнить состояние нервно-мышечной системы и ответа физиологических систем на выполнение модельных операций на примере одного и того же космонавта.

Цель нашего исследования – провести сравнительную оценку изменений силы мышц ног и ответа сердечно-сосудистой системы космонавта на выполнение заданий, имитирующих ВКД на поверхности после полетов разной продолжительности.

Материалы и методы

В исследовании принимал участие космонавт Роскосмоса. В соответствии с Хельсинкской декларацией испытуемый подписал Информированное согласие на участие в эксперименте. Всего за свою профессиональную карьеру космонавт совершил два длительных космических полета и один кратковременный. Динамику изменений максимальной произвольной силы (МПС) мышц ног оценивали по результатам изокинетического тестирования (Субех). Тестирование проводилось за 30 и 60 дней до космического полета и на 4-й и 15-й дни после его завершения по стандартному протоколу [1, 17]. После короткого полета оценка МПС была выполнена на 3-й день. МПС оценивали по максимальной попытке из пяти выполненных на угловой скорости 0 °/с. МПС мышц голени – по максимальной попытке из пяти повторений тыльного и подошвенного сгибания на угловой скорости 30 °/с. При оценке изменений МПС мышц ног начальный уровень проявления силы перед космическим полетом принимался за 100 %.

Средства профилактики негативных влияний невесомости в коротком полете не использовались. Во время длительного полета физическая подготовка проводилась в соответствии с российской системой профилактики негативных влияний невесомости. Система профилактики более подробно описана ранее [9]. «Вес» отягощения при выполнении силовых упражнений на тренажере ARED приведен в табл.

«Вес» отягощения в упражнениях для мышц ног в 1-м и 2-м полетах

№ полета	Упражнение			
	Приседание, кг	Подъем на носки, кг	Становая тяга, кг	Румынская тяга, кг
1-й	80	115	80	60
2-й	90	110	70	60

Физическая работоспособность оценивалась на основе определения реакции сердечно-сосудистой системы на выполнение задач, имитирующих ВКД в условиях обезвешивания в скафандре и без скафандра в условиях нормальной земной гравитации. Частота сердечных сокращений (ЧСС) регистрировалась до и после каждого блока операций. Выполнение модельных операций в скафандре проводилось до и после 2-го длительного космического полета, до и после короткого космического полета.

Моделирование ВКД на поверхности включало в себя несколько операций: операции в шлюзовом отсеке, перемещение к рабочему месту ВКД (в том числе перемещение вдоль мягкого фала), движение за контейнером, взятие контейнера и перемещение с ним к лестнице, закрепление антенны на поручне трапа, стыковка электрических разъемов, возвращение в шлюзовой отсек и закрытие люка.

Экспресс-тесты для оценки физической работоспособности без скафандра проводились с полным весом тела. Тесты включали оценку веса трех образцов одинакового размера, вставание из положения лежа (с определением стратегии выполнения) и различные виды ходьбы. Во время экспресс-тестов ЧСС регистрировалась в каждой операции.

Результаты и обсуждение

Сравнение МПС мышц ног космонавта после трех полетов разной продолжительности показало, что наибольшее снижение показателя при изометрическом режиме мышечного сокращения произошло в сгибателях бедра на третьи сутки после третьего (короткого) полета, потери составили 33 % от исходного уровня (рис. 1). Снижение данного показателя на четвертые сутки после первого полета составляло 22 %, наименьшие потери были выявлены на четвертые сутки после второго полета, потери составляли 9 %. В разгибателях бедра после первого полета выявлено увеличение МПС, прирост составил 13 %; после второго и третьего полетов показатель снижался на 7 и 11 % соответственно.

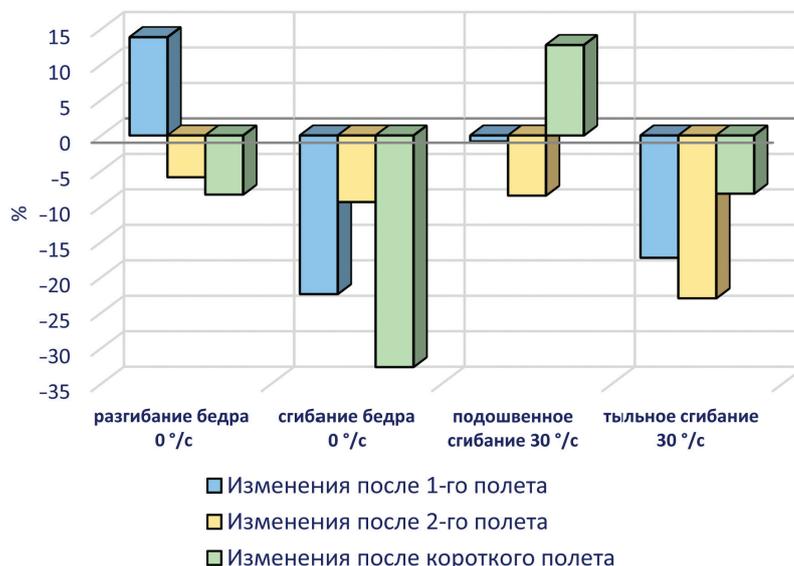


Рис. 1. Изменения МПС мышц ног космонавта после полетов разной продолжительности

Интересно отметить, что МПС мышц голени в изокинетическом режиме мышечного сокращения после короткого полета увеличилась на 12 % при подошвенном сгибании, а при тыльном сгибании снизилась на 10 %. Наибольшие снижения МПС мышц голени выявлены при тыльном сгибании после второго полета, потери составили 25 %; после первого полета сила снизилась на 19 %.

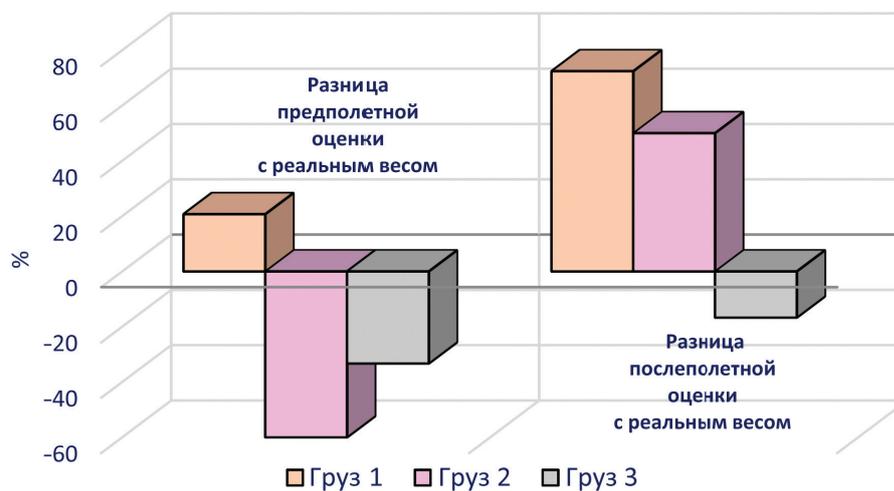


Рис. 2. Результаты субъективной оценки веса образцов после кратковременного космического полета, %

Все модельные операции как в условиях обезвешивания, так и с весом собственного тела были выполнены успешно. Выполнение модельных операций без скафандра показало превышение максимальных значений ЧСС после короткого космического полета на 10 ударов. Также имело место завышение веса объекта (рис. 2). Время подъема из положения лежа до и после полета составляло 4 и 3 секунды соответственно, т. е. увеличения времени на выполнение действия не наблюдалось.

Оценка реакции сердечно-сосудистой системы на выполнение операций, имитирующих ВКД на поверхности в скафандре, не показала увеличения физиологической цены нагрузки (рис. 3) и времени на выполнение операций после короткого полета (рис. 5), однако физиологическая стоимость нагрузки была увеличена после длительного космического полета (рис. 4). Время выполнения операций после длительного космического полета было увеличено на 6 % (рис. 6). Перед длительным полетом циклограмма была выполнена космонавтом на 100 %, после полета – на 93 %.

Основным эффектом невесомости является отсутствие влияния веса тела на опорно-двигательный аппарат. Физиологические реакции, вызванные длительным пребыванием в невесомости, характеризуют адаптацию к новым условиям окружающей среды и дефициту механических нагрузок. В условиях невесомости изменяется поток афферентных сигналов от рецепторов сухожилий и мышечных рецепторов. С функциональной точки зрения различают медленные и быстрые мышечные волокна. Медленные волокна состоят из мышечных волокон, богатых митохондриями и миоглобином.

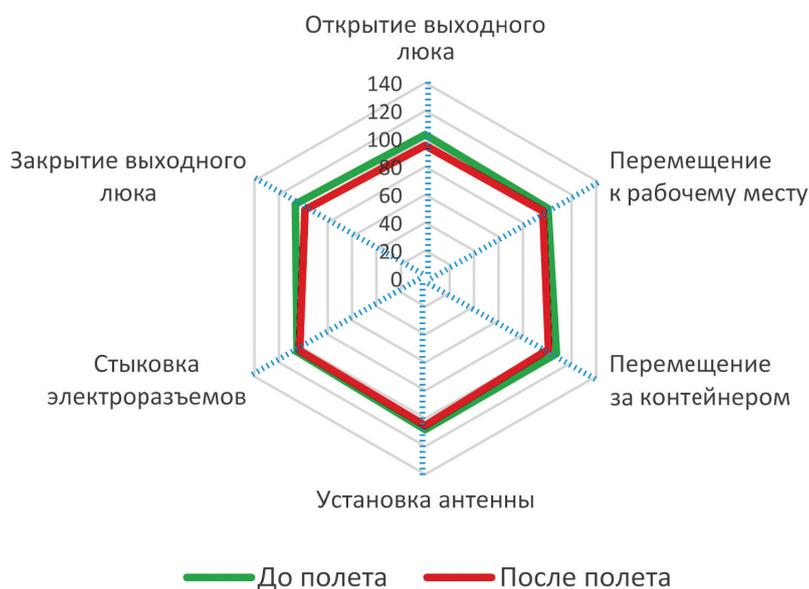


Рис. 3. Средние значения ЧСС при выполнении операций в скафандре до и после короткого КП

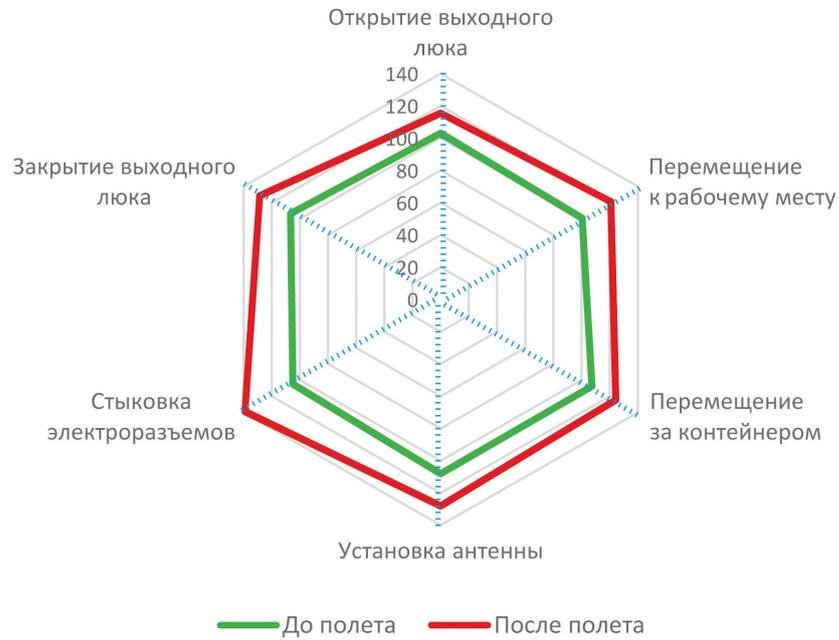


Рис. 4. Средние значения ЧСС при выполнении операций в скафандре до и после длительного КП

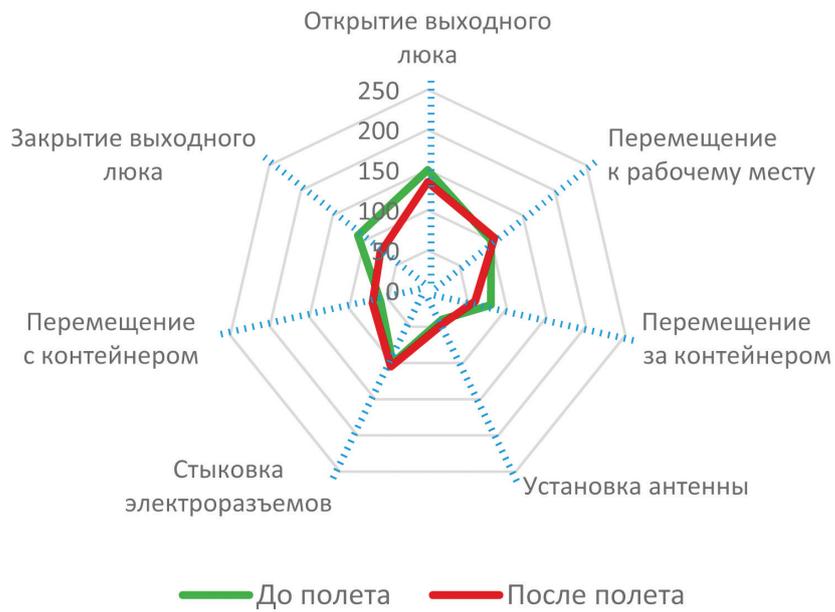


Рис. 5. Время выполнения операций в скафандре до и после короткого КП

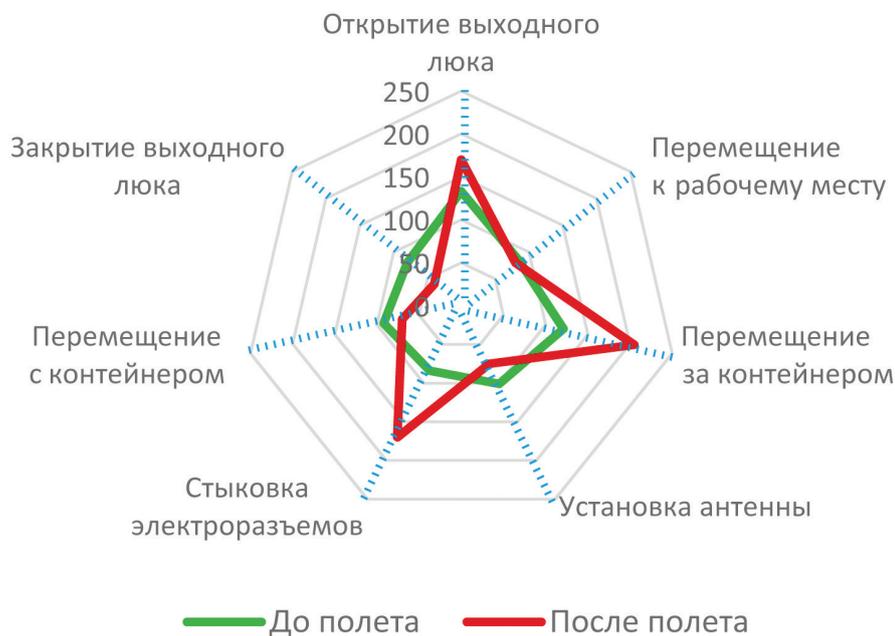


Рис. 6. Время выполнения операций в скафандре до и после длительного КП

Окруженная медленными мышечными волокнами богатая сеть капилляров позволяет получать большое количество кислорода из крови. Медленные волокна характеризуются высокой выносливостью к нагрузке, но сниженной максимальной силой и скоростью сокращения. Быстрые волокна состоят из большого количества миофибрилл. Их окружает меньше капилляров, в клетках меньше митохондрий и миоглобина. Быстрые волокна обеспечивают выполнение больших мышечных усилий. Соотношение между количеством медленных и быстрых мышечных волокон в разных мышцах неодинаково, поэтому сила их сокращения также различна. Медленные волокна лучше, чем быстрые, приспособлены к длительным, повторяющимся сокращениям с преимущественно аэробным типом ресинтеза АТФ, характерным для упражнений на выносливость. Кроме того, состав мышц генетически предопределен, но при воздействии невесомости или имитируемых условий космического полета [10] наблюдаются значительные перестройки мышечного фенотипа. В условиях невесомости медленные волокна более склонны к атрофии, чем быстрые [11]. Снижение активности медленных волокон, их атония, приводит к ускоренному разложению мышечных белков.

Сравнение послеполетных изменений в нервно-мышечной и костной системе человека, вызванных пребыванием в невесомости, с параметрами повторной нагрузки вдоль вертикальной оси тела, выполняемой в полете, показало, что нагрузка в 100–120 % от массы тела на Земле позволяет обеспечить запуск гравитации-зависимых механизмов сохранения свойств

нервно-мышечной и костной систем [12]. Эти результаты согласуются с полученными нами данными о величине снижения МПС у обследованного нами космонавта.

Выполнение повторных космических полетов сопровождается меньшим МПС, чем при первом полете. Это согласуется с полученными нами данными о снижении величины потерь при каждом следующем полете в случае аналогичного противодействия негативным последствиям невесомости. Так, после первого полета снижение МПС сгибателей бедра составило 22 %, после второго полета – около 9 %. Интересно, что после короткого полета без использования средств профилактики величина потерь силы в одном показателе была самой высокой и составила около 33 %, в остальных изучаемых показателях потери МПС были меньше, чем в шестимесячном полете. А в мышцах голени при подошвенном сгибании в коротком полете выявлен прирост силы по сравнению с фоновыми данными. Мы предполагаем, что снижение силовых характеристик мышц-сгибателей бедра может негативно повлиять на способность космонавта передвигаться по поверхности Луны или Марса при наличии сложного рельефа. Изменения мышечной силы после шестимесячных полетов полностью согласуются с данными, полученными нами ранее на большой выборке космонавтов [12].

Говоря о ВКД, необходимо иметь в виду возможность решения дополнительных задач, таких как необходимость длительных перемещений по труднопроходимой местности, максимальных усилий при возникновении чрезвычайных ситуаций и трудностей при выполнении работ в условиях недостаточного освещения. Эксперименты в гидролаборатории показали увеличение трудозатрат при выполнении сложных работ и возможность ошибочных действий по управлению работой систем скафандра и даже отсутствие реакций на аварийные ситуации [6].

Внимание научного сообщества привлекают и другие факторы, сопровождающие пребывание человека в условиях Луны, такие как лунная пыль [13, 14], радиация, шум, гиперкапния, гипоксия, возможность декомпрессии, однообразное питание, перераспределение жидкостей организма, нарушение 24-часового чередования дня и ночи, социальная депривация и навязывание контактов [15, 16].

Таким образом, результаты нашего исследования показали, что после кратковременного космического полета некоторое снижение максимальных возможностей нервно-мышечной системы не будет ограничивающим фактором для выполнения ВКД на поверхности на третий день после полета. Продолжение исследований способности космонавта к выполнению сложных операторских задач после полета, сопоставимого по длительности с полетом на Луну, позволит ответить на вопрос о необходимом составе средств и методов профилактики негативных влияний невесомости при выполнении лунных миссий.

Выводы

1. При выполнении космонавтом модельных операций в скафандре с перемещением в пространстве выявлено, что после длительного полета время выполнения операций увеличилось в два раза по сравнению с фоном при перемещении за контейнером, не изменилось при перемещении к рабочему месту и снизилось на 12 % при перемещении с контейнером. При этом МПС мышц ног после этого полета снизилась по сравнению с фоном незначительно по всем изучаемым показателям, кроме силы мышц голени при тыльном сгибании (-25 %).

2. После короткого полета при выполнении космонавтом модельных операций в скафандре с перемещением в пространстве, время выполнения операций увеличилось на 10 % при перемещении с контейнером, при перемещении к рабочему месту время осталось таким же, как до полета, а при перемещении за контейнером снизилось по сравнению с фоном на 20 %. МПС мышц ног после этого полета снизилась в пределах 10 %: в мышцах бедра при разгибании в коленном суставе и в мышцах голени при тыльном сгибании; значительно снизилась в мышцах бедра при сгибании в коленном суставе (-33 %) и увеличилась в мышцах голени при подошвенном сгибании (12 %). Увеличилось время операций, выполняемых вручную, что может указывать на изменения в системе управления движениями.

3. Несмотря на ежедневные мероприятия, направленные на профилактику негативных влияний невесомости, наблюдалось снижение функциональных возможностей сердечно-сосудистой системы после длительного космического полета, чего не наблюдалось после короткого полета без использования средств профилактики.

4. Отсутствие значительного увеличения физиологической стоимости нагрузки и времени выполнения операций в скафандре в условиях «лунного» обезвешивания говорит о достаточно высоком уровне работоспособности и позволяет прогнозировать высокую успешность выполнения задач ВКД после пребывания в условиях невесомости во время полета на Луну.

Исследование поддержано базовым финансированием РАН 63.1.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Годичная миссия на МКС – шаг к межпланетным полетам / Е.В. Фомина, Н.Ю. Лысова, Т.Б. Кукоба [и др.] // Аэрокосмическая и экологическая медицина. – 2017. – № 12. – С. 1094–1099.
- [2] Архангельский, Н.И. Варианты траектории пилотируемого полета на Марс с использованием двигательных установок большой тяги / Н.И. Архангельский, Е.И. Музыченко, А.А. Синицин // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 3(34). – С. 96–110.
- [3] Фомина, Е.В. МКС – платформа для разработки системы противодействия гипогравитационным возмущениям в межпланетных миссиях / Е.В. Фомина,

- Н.А. Сенаторова, В.В. Кириченко, И.В. Вагнер // Журнал Аэрокосмической сферы. – 2020. – № 4(105). – С. 8–17.
- [4] Вызовы космической медицины при освоении Луны человеком: риски, адаптация, здоровье, работоспособность / В.М. Баранов, В.П. Катунцев, М.В. Баранов [и др.] // Ульяновский биомедицинский журнал. – 2018. – № 3. – С. 109–123.
- [5] Лунные астронавты Аполлона демонстрируют более высокую смертность от сердечно-сосудистых заболеваний: возможное воздействие радиации глубокого космоса на эндотелий сосудов / М. Дельп, Дж. Чарват, С. Лимоли [и др.] // Научные отчеты. – 2016. – Т. 6. – № 1. – С. 1–11.
- [6] Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при выполнении лунных миссий / Б.И. Крючков, В.М. Усов, В.И. Ярополов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 2(19). – С. 35.
- [7] Сергеев, С.Ф. Эргономические проблемы освоения Луны / С.Ф. Сергеев, М.А. Козырева // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. – Москва: Институт психологии РАН, 2021. – С. 231–253. – DOI 10.38098/ergo.2021
- [8] Предсказатели готовности космонавта к работе на поверхности Марса по данным орбитальных полетов на борту Международной космической станции / Е.В. Фомина, Н.Ю. Лысова, С.К. Резванова [и др.] // Аэрокосмическая и экологическая медицина. – 2019. – № 7. – С. 19–27.
- [9] Оценка кинетики сердечно-сосудистой системы с помощью упражнений на беговой дорожке – инструмент для мониторинга физической подготовки во время космических полетов / Дж. Кошате, У. Хоффман, Н.Ю. Лысова [и др.] // Акта Астронавтика. – 2021. – Т. 186. – С. 280–288.
- [10] Реактивные прыжки сохраняют структуру скелетных мышц, фенотип и окислительную способность миофибрилл при постельном режиме / Д. Блоттнер, М. Хастерманн, Р. Вебер [и др.] // Границы физиологии. – 2020. – Т. 10. – С. 1527.
- [11] Шенкман, Б.С. От медленного к быстрому. Гипогравитационная перестройка миозинового фенотипа мышечных волокон // Acta Naturae (русскаяязычная версия). – 2016. – Т. 8. – №. 4 (31). – С. 52 – 65.
- [12] Фомина, Е.В. Восстановление мышечной силы после длительных и сверхдлинных космических полетов / Е.В. Фомина, Т.Б. Кукоба // Материалы Международного астронавтического конгресса, МАК. – 2020.
- [13] Влияние солнечного ветра на формирование фотоиндуцированного слоя пылевой плазмы вблизи поверхности Луны / Е.А. Лисин, В.П. Тараканов, О.Ф. Петров [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 98. – С. 664–669.
- [14] Система пылевой плазмы в поверхностном слое освещенной части Луны / А.П. Голуб, Г.Г. Дольников, А.В. Захаров [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2012. – Т. 95. – С. 182–187.
- [15] Стан, А.К. Мозг в космосе: важность понимания влияния длительного космического полета на пространственное познание и его нейронную сеть / А.К. Стан, С. Кюн // Cogn ПроцессCogn. 2021, сентябрь 22 (доп. 1). – С. 105–114.
- [16] Крючков, Б.И. Имитационная математическая модель внекорабельной деятельности космонавтов на поверхности Марса / Б.И. Крючков, П.П. Долгов // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 1(46). – С. 61–73.
- [17] Kharlamov, M.M. Tasks of Professional Activity of Astronauts on the Moon and in Deep Space: Development of Methods and Technologies / M.M. Kharlamov,

B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, P.P. Dolgov // GLEX-2021,7,4,3,x62705. – URL: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/62705/abstract-pdf/GLEX-2021,7,4,3,x62705.briefdescription.pdf?2021-02-23>.

REFERENCES

- [1] One-year Mission on Board the ISS is a Step Towards Interplanetary Flights / E.V. Fomina, N.Yu. Lysova, T.B. Kukoba [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2017. – No 12. – P. 1094–1099.
- [2] Arkhangel'sky, N.I. Trajectory Options When Performing a Manned Flight to the Mars Using High-thrust Propulsion / N.I. Arkhangel'sky, E.I. Muzychenko, A.A. Sinitsin // *Space Technique and Technologies*. – 2021. – No 3(34). – P. 96–110.
- [3] Fomina, E.V. ISS is a Platform for Development of a Hypogravitational Disturbances Countermeasure System During Interplanetary Missions / E.V. Fomina, N.A. Senatorova, V.V. Kirichenkov, I.V. Wagner // *Journal of Aerospace Sphere*. – 2020. – No 4(105). – P. 8–17.
- [4] Space Medicine Challenges When Moon Exploration: Risks, Adaptation, Health, Efficiency / V.M. Baranov, V.P. Katuntsev, M.V. Baranov [et al.] // *Ulyanovsk Biomedical Journal*. – 2018. – No 3. – P. 109–123.
- [5] Apollo Lunar Astronauts Demonstrate Higher Mortality Caused by Cardiovascular Diseases: Possible Effects of Deep Space Radiation on Vascular Endothelium / M. Delp, J. Charvat, S. Limoli [et al.] // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – No 1. – P. 1–11.
- [6] About Features of Cosmonaut Professional Activity When Performing Lunar Missions / B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, V.I. Yaropolov [et al.] // *Manned Space Flight*. – 2016. – No 2(19). – P. 35.
- [7] Sergeev, S.F. Ergonomic Issues of Lunar Exploration / S.F. Sergeev, M.A. Kozyreva // *Actual Problems of Labor Psychology, Engineering Psychology and Ergonomics*. – Moscow: Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, 2021. – P. 231–253. – DOI 10.38098/ergo.2021
- [8] Predictors of Cosmonaut Readiness to Work on the Mars Surface in Accordance with ISS Orbital Flight Data / E.V. Fomina, N.Yu. Lysova, S.K. Rezvanova [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2019. – No 7. – P. 19–27.
- [9] Assessment of the Cardiovascular System Kinetics Using Treadmill Exercises – a Tool for Monitoring Physical Fitness During Space Flight / J. Koshate, U. Hoffman, N.Yu. Lysova [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2021. – Vol. 186. – P. 280–288.
- [10] Jet Jumps Preserve Structure of Skeletal Muscles, Phenotype and Myofibrils Oxidative Ability During Bed Rest / D. Blottner, M. Hastermann, R. Weber [et al.] // *Frontiers of Physiology*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1527.
- [11] Shankman, B.S. From Slow to Fast. Hypogravitational Rearrangement of Muscle Fibers Myosin Phenotype // *Acta Naturae (Russian-language version)*. – 2016. – Vol. 8. – No 4(31). – P. 52–65.
- [12] Fomina, E.V. Restoration of Muscle Strength after Long and Ultra-long Space Flights / E.V. Fomina, T.B. Kukoba // *Proceedings of the International Astronautical Congress, MAC*. – 2020.
- [13] The Effect of Solar Wind on the Formation of Photoinduced Dust Plasma Layer Near the Moon Surface / E.A. Lisin, V.P. Tarakanov, O.F. Petrov [et al.] // *Jetp Lett*. – 2014. – Vol. 98. – P. 664–669.

- [14] Dust Plasma System in the Surface Layer of Illuminated Part of the Moon / A.P. Golub, G.G. Dolnikov, A.V. Zakharov [et al.] // *Jetp Lett.* 95, 182–187 (2012).
- [15] Stan, A.K. Brain in Space: Importance of Understanding the Impact of Long-term Space Flight on Spatial Cognition and its Neural Network / A.K. Stan, S. Kyun. – *Cogn ProcessSodp.*, 2021 September, 22 (Supplement 1). – P. 105–114. – DOI:10.1007/s10339-021-01050-5
- [16] Kryuchkov, B.I. Simulative Mathematical Model of Cosmonaut Extravehicular Activity on the Mars Surface / B.I. Kryuchkov, P.P. Dolgov // *Manned Space Flight.* – 2023. – No 1(46). – P. 61–73.
- [17] Kharlamov, M.M. Tasks of Professional Activity of Astronauts on the Moon and in Deep Space: Development of Methods and Technologies / M.M. Kharlamov, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, P.P. Dolgov // GLEX-2021,7,4,3,x62705. – URL: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/62705/abstract-pdf/GLEX-2021,7,4,3,x62705.briefdescription.pdf/2021-02-23>.