

РОЛЬ БЫСТРОГО БЕГА В ПРЕДОТВРАЩЕНИИ НЕГАТИВНЫХ ВЛИЯНИЙ ПРЕБЫВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА В НЕВЕСОМОСТИ

Е. В. Фомина[✉], Н. А. Сенаторова, В. Д. Бахтерева, Е. Н. Ярманова, И. Б. Козловская

Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Россия, Москва

Перспектива освоения дальнего космоса определяет необходимость модификации принципов и методов системы профилактики негативного влияния невесомости на организм человека. Целью исследования было определить роль бега с высокой скоростью во время локомоторных тренировок, выполняемых в ходе космического полета (КП), в сохранении уровня физической работоспособности человека. В исследовании приняли участие 10 космонавтов. Оценка физической работоспособности проводилась на всех этапах КП на основе теста «Индивидуальные стратегии» (ТИС). Во время выполнения ТИС регистрировались частота сердечных сокращений (ЧСС), параметры газообмена, концентрация лактата в капиллярной крови. Космонавты были разделены на две группы на основе различий в среднем объеме бега с высокой скоростью в ходе одной тренировки на дорожке. В группе А ($n = 4$) средняя дистанция быстрого бега составила 949 м/день, в группе Б ($n = 6$) — 2669 м/день. ЧСС в группе А после КП увеличилась на ступенях от 5 до 8 км/ч ($p < 0,05$). Повышение легочной вентиляции после КП наблюдалось в группе А на ступенях нагрузки от 8 до 15 км/ч ($p < 0,05$). После КП концентрация лактата в капиллярной крови в периоде восстановления после теста в группе А увеличилась на 37% ($p = 0,03$). Пульсовая сумма работы и восстановления оказались выше после КП в группе А на 14% ($p = 0,02$) и 15% ($p = 0,03$) соответственно, в то время как в группе Б различий не обнаружено. Таким образом, наша гипотеза о том, что бег с высокой скоростью воспроизводит сенсорный приток, сопоставимый с условиями Земли, и, как следствие, обеспечивает включение физиологических механизмов, противодействующих негативному влиянию невесомости, подтверждена в космическом эксперименте.

Ключевые слова: локомоторные тренировки, тест с физической нагрузкой, физическая работоспособность, космический полет, эргоспирометрия

Финансирование: работа поддержана финансированием РАН 63.1 и госкорпорацией Роскосмос.

Благодарности: выражаем благодарность космонавтам за участие в эксперименте (ЦПК им. Гагарина), старшему научному сотруднику, к.б.н. Н. Ю. Лысовой (ГНЦ РФ ИМБП РАН), С. В. Резвановой (ГКУ «ЦСТиСК» Москомспорта) за участие в проведении эксперимента и сборе данных, Беда О. О. за участие в сопровождении сеансов эксперимента в ЦУПе, Смирнову Ю. И. за участие в подготовке документации, Кукоба Т. Б., Бабич Д. Р., Романову П. В. за разработку индивидуальных протоколов силовых тренировок и сопровождение силовых тренировок в ходе космического полета.

Вклад авторов: Е. В. Фомина — организация и сопровождение эксперимента «Профилактика-2», проведение сессий эксперимента, написание статьи; Н. А. Сенаторова — проведение сессий эксперимента, сопровождение эксперимента, статистическая обработка результатов, литературный обзор и оформление статьи; В. Д. Бахтерева — обработка данных, написание статьи; Е. Н. Ярманова — инженерное сопровождение средств профилактики, разработка тренажера «БД-2» совместно с И. Б. Козловской; И. Б. Козловская — определение целей, задач и методов эксперимента.

Соблюдение этических стандартов: эксперимент «Профилактика-2» одобрен этическим комитетом ИМБП (протокол № 368 от 22 августа 2014 г.). Все участники подписали добровольное информированное согласие.

✉ **Для корреспонденции:** Елена Валентиновна Фомина
Хорошевское шоссе, 76А, г. Москва, 123007, Россия; fomin-fomin@yandex.ru

Статья получена: 15.06.2023 **Статья принята к печати:** 15.10.2023 **Опубликована онлайн:** 19.11.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.046

THE ROLE OF FAST RUNNING IN PREVENTION OF NEGATIVE EFFECTS OF PROLONGED EXPOSURE TO WEIGHTLESSNESS

Fomina EV[✉], Senatorova NA, Bakhtereva VD, Yarmanova EN, Kozlovskaya IB

State Scientific Center of Russian Federation — Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

The prospects of deep space exploration necessitate modification of the principles and methods underlying the system designed to prevent negative impact of weightlessness on the human body. This work aimed to determine how fast running, as part of locomotor training during a space flight (SF), helps maintain physical ability of a person. The study involved 10 cosmonauts; their physical performance was assessed at all stages of the SF with the help of the Individual Strategies Test (IST). The parameters registered when the participants were doing the IST included heart rate (HR), gas exchange, capillary blood lactate concentration. The cosmonauts were divided into two groups based on the differences in the mean distance covered while fast running on a treadmill (single session). Group A ($n = 4$) run 949 m/day on average, group B ($n = 6$) — 2669 m/day. After SF, HR in group A increased at speeds from 5 to 8 km/h ($p < 0.05$), pulmonary ventilation indicators grew at speeds from 8 to 15 km/h ($p < 0.05$), and the capillary blood lactate concentration measured during the post-test recovery period increased by 37% ($p = 0.03$). Moreover, after SF, the pulse sum recorded under load and during recovery was 14% ($p = 0.02$) and 15% ($p = 0.03$) in group A, respectively, while in group B we registered no differences. Thus, our hypothesis that fast running triggers sensory reactions simulating Earth conditions for the body, which consequently activates physiological mechanisms counteracting the negative effects of weightlessness, has been confirmed in a space experiment.

Keywords: locomotor training, physical activity test, physical performance, space flight, ergospirometry

Funding: the work was financially supported by the Russian Academy of Sciences (63.1) and Roscosmos State Corporation.

Acknowledgements: we express our gratitude to the cosmonauts for participating in the experiment (Yuri Gagarin Cosmonaut Training Center); Lysova N.Yu., senior researcher, Candidate of Biological Sciences, (Institute of Biomedical Problems); Rezvanova S.V. (Center for Innovative Sports Technology and National Teams Training) for participation in the experiment and data collection; Beda O.O. for supporting the experiment's sessions in the MCC; Smirnov Yu.I. for participation in the preparation of documentation; Kukoba T.B., Babich D.R., Romanov P.V. for development of the individual strength training protocols and strength training supervision during the space flight.

Author contribution: Fomina EV — organization and support of the Prophylactika-2 experiment, conducting sessions of the experiment, article authoring; Senatorova NA — conducting sessions of the experiment, support of the experiment, statistical processing of the results, literary review and arrangement of the article; Bakhtereva VD — data processing, article authoring; Yarmanova EN — engineering support of countermeasures, development of the BD-2 treadmill in collaboration with I.B. Kozlovskaya; Kozlovskaya IB — selection/formulation of goals, objectives and methods of the experiment.

Compliance with ethical standards: the Prophylactika-2 experiment was approved by the Ethics Committee of the Institute of Biomedical Problems (Minutes #368 of August 22, 2014). All participants signed a voluntary informed consent form.

✉ **Correspondence should be addressed:** Elena V. Fomina
Khoroshevskoe shosse, 76A, Moscow, 123007, Russia; fomin-fomin@yandex.ru

Received: 15.06.2023 **Accepted:** 15.10.2023 **Published online:** 19.11.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.046

Разработка методов сохранения здоровья и работоспособности космонавтов во время длительных космических полетов — ключевая задача космической медицины [1–4]. Подготовка к освоению Луны и Марса или реализации сценария выживания в случае приземления корабля в незапланированном месте актуализирует поиск путей обеспечения высокой работоспособности космонавта, поддержания функциональных резервов организма, эффективной и надежной деятельности при выполнении сложных внекорабельных задач на поверхности. Изменения при длительном пребывании в условиях невесомости затрагивают сердечно-сосудистую [5–10], дыхательную [11] и скелетно-мышечную [12–14] системы. Таким образом, профилактика негативных влияний невесомости должна быть адресована всем этим системам. Данные космических полетов и модельных исследований свидетельствуют о том, что осевая разгрузка в условиях невесомости способствует снижению опорной афферентации, что впоследствии приводит к атонии и атрофии мышечных волокон и нарушениям в вестибулярной системе [14, 15]. Поскольку раздражение проприоцептивного и тактильного входов необходимо для осуществления постурального контроля, поддержание этих систем настроенными на удержание вертикального равновесия во время бега в условиях невесомости может улучшить выполнение функциональных задач после полета [16, 17]. Таким образом, интенсивные физические тренировки с целью противодействия негативным перестройкам в функционировании гравизависимых физиологических систем в условиях невесомости — обязательный элемент медицинского обеспечения длительных космических полетов [16, 18–20].

Ранее нами были определены величины осевой нагрузки и объем локомоций в пассивном режиме движения полотна бегущей дорожки (с помощью силы ног), обеспечивающие эффективную локомоторную тренировку во время космического полета [21]. Настоящее исследование посвящено определению роли бега с высокой скоростью в активном режиме движения полотна дорожки в эффективности локомоторной тренировки. Обеспечение противодействия негативному влиянию невесомости, по нашему мнению, может определяться работой, имитирующей поддержание или перемещение веса в условиях Земли. Можно сказать, что профилактическая эффективность метода состоит в обеспечении условий, воспроизводящих эффекты действия силы тяжести и создании соответствующего сенсорного притока при выполнении механической работы. В условиях невесомости и так называемой механической разгрузки только интенсивная работа переводит организм на уровень метаболических и функциональных затрат, сопоставимый с условиями Земли. Целью исследования было определение роли бега с высокой скоростью в сохранении физической работоспособности человека в ходе длительного космического полета.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика обследуемых лиц

В статье приводятся результаты, полученные в ходе реализации космического эксперимента «Профилактика-2». В исследовании приняли участие 10 космонавтов (возраст 44 ± 6 лет, вес 84 ± 6 кг, продолжительность космических полетов 173 ± 33 суток).

Критериями включения участников в эксперимент были: мужской пол, длительный космический полет (около 6 месяцев). Критерии исключения: неполное или несвоевременное выполнение сессий эксперимента, а также значительные различия в применении тренировочных схем в ходе космического полета.

Профилактика негативных влияний невесомости во время космического полета

Основной метод профилактики негативных влияний невесомости — физические тренировки. Их общая продолжительность во время космического полета составляла 2,5 часа в сутки, включая подготовительные операции и гигиенические процедуры. В соответствии с бортовой документацией, космонавты каждый день выполняли две физические тренировки. Локомоторные тренировки на беговой дорожке БД-2 (ИМБП; Россия) осуществляли ежедневно, а тренировки на велоэргометре ВБ-3М (ИМБП; Россия) и силовом тренажере ARED (NASA; США) чередовали через день.

Тренировки на дорожке — ключевой элемент профилактики гипогравитационных нарушений российских космонавтов. Протоколы бортовой документации для тренировок на дорожке в соответствии с четырехдневным микроциклом были определены на основе результатов модельных наземных экспериментов [22]. После введения в эксплуатацию дорожки БД-2 протоколы были несколько модифицированы с сохранением принципа чередования интервалов высокоинтенсивного бега с интервалами ходьбы. Строго говоря, в соответствии с существующей классификацией методов тренировок, все упражнения по протоколам осуществляются переменным методом, различаясь максимальной скоростью бега и вкладом силового компонента, обусловленного долей пассивного режима движения полотна дорожки. Дорожка БД-2 обеспечивает перемещение полотна в активном режиме, то есть с помощью мотора, и в пассивном режиме, когда движение полотна дорожки осуществляется посредством силы ног космонавта.

По всем тренировочным протоколам на дорожке космонавты вначале выполняли разминку в виде бега в течение 4 мин со скоростью 7 км/ч, далее — нагрузочную часть в пассивном режиме работы полотна дорожки, включающую чередование ходьбы в пассивном режиме движения полотна с двумя интервалами двухминутного бега со скоростью 6–8 км/ч.

В завершение всех тренировочных протоколов выполняли ходьбу в течение 2 мин со скоростью 5 км/ч, далее — бег в течение 2 мин со скоростью 8 км/ч в активном режиме работы полотна дорожки и затем — ходьбу в пассивном режиме продолжительностью 1 мин.

Основная часть тренировочного протокола на дорожке изменялась в различные дни микроцикла.

Первый день — четыре интервала быстрого бега со скоростью 14 км/ч и продолжительностью по 1 мин чередовали с интервалами ходьбы в течение 2 мин.

Второй день — два интервала бега в пассивном режиме со скоростью 8 км/ч и один интервал в активном режиме со скоростью 12 км/ч и продолжительностью 2 мин чередовали с интервалами ходьбы продолжительностью 2 мин.

Третий день — интервалы бега продолжительностью 4 мин со скоростью до 13 км/ч чередовали с интервалами ходьбы продолжительностью 2 мин.

Четвертый день свободный, возможны выполнение индивидуального протокола локомоторной тренировки или отдыха.

Большинство лиц, принявших участие в эксперименте, выполняли профилактические мероприятия согласно вышеизложенной схеме, при этом четыре космонавта в четвертый день микроцикла не выбирали отдых, а начинали микроцикл заново, два — выполняли индивидуальный протокол с интервальной нагрузкой и еще два — предпочитали отдых. Два космонавта, совершавшие четвертый по счету космический полет, использовали индивидуальную программу локомоторных тренировок по семидневному микроциклу, где последний день приходился на воскресенье и предполагал отдых.

Параметры каждой тренировки в длительном полете анализировали на основе еженедельного получения эргометрической и физиологической информации с выдачей рекомендации по продолжению тренировок на дорожке. Ответ сердечно-сосудистой системы на локомоторную нагрузку учитывали на основе регистрации частоты сердечных сокращений (ЧСС) во время тренировки. По завершении полета вычисляли средние значения каждого вида локомоций за месяц миссии и весь полет. Основные параметры тренировок на дорожке — величина осевой нагрузки, соотношение пассивного и активного режима работы полотна бегущей дорожки, а также дистанция ежедневных локомоторных нагрузок — имели невысокую вариативность в обследованной группе космонавтов. Рекомендованная величина осевой нагрузки составляла не менее 70% от веса тела, и в основном космонавты учитывали ее. Рекомендованная доля пассивного режима движения полотна дорожки за тренировку различалась по дням микроцикла, составляя в среднем 30% за три дня. В обследованной выборке доля пассивного режима составила от 23 до 41% от общего локомоторного объема за день, но у одного космонавта, выполнявшего индивидуальную программу, этот параметр составил только 8,2%. Величина дистанции, пройденной за тренировку, также различалась по дням микроцикла и составляла в различные дни от 3000 до 6000 м.

Тренировки на силовом тренажере все космонавты выполняли по индивидуальным протоколам. Первоначально протокол нагрузки составляли в соответствии с весом тела космонавта до полета, в ходе полета нагрузку изменялась для обеспечения волнообразности тренировочного процесса. Еженедельно специалисты по профилактике гипогравитационных нарушений получали информацию об упражнениях на силовом тренажере и корректировали тренировочный процесс.

Тренировки на велоэргометре, согласно отчетам экипажа, выполняли в соответствии с бортовой документацией, то есть их строили переменным методом с чередованием интервалов педалирования с различной интенсивностью. Получение объективной информации об интенсивности нагрузки и реакции сердечно-сосудистой системы на выполнение физической тренировки на велоэргометре в настоящее время не обеспечивается.

Экспериментальные группы

Космонавты были разделены на две группы на основе различий в доле бега с высокой скоростью при выполнении тренировок на бегущей дорожке. До полета различий между группами А и Б по физиологическим параметрам при выполнении локомоторного теста не зарегистрировано.

В группе А ($n = 4$) средняя дистанция быстрого бега в активном режиме движения полотна во время локомоторных тренировок на бегущей дорожке составила в среднем за полет 949 м в день, в группе Б ($n = 6$) — 2669 м в день.

Тестовые процедуры

Оценку уровня физической работоспособности проводили на основе ТИС за 30 суток до космического полета, 3–4 раза в ходе полета (на 42–68, 83–113, 115–131 и 140–156 сутки полета) и на 10 ± 2 -е сутки после его завершения [23]. Тест «Индивидуальные стратегии» (ТИС) выполняли по стандартному протоколу на бегущей дорожке БД-2 в активном режиме перемещения полотна дорожки и состоял из разминки с чередованием интервалов ходьбы со скоростью 3 км/ч и 6 км/ч в псевдорандомизированной последовательности и ступенчато-возрастающей нагрузки от 3 до 15 км/ч, в которой приращение скорости составляло 1 км/ч каждые 30 с.

Во время выполнения теста осуществляли регистрацию ЧСС с использованием приборов Polar (Polar; Финляндия) и «Кардиокассета-2010» (ИМБГ; Россия). Эргоспирометрию проводили в наземных условиях комплексом Oxycon Mobile (Jaeger; Германия) методом «breath-by-breath». Измерение содержания лактата в капиллярной крови осуществляли с использованием комплекта «Лактат-2» (ИМБГ; Россия) в условиях покоя до выполнения теста, далее — на первой и пятой минутах восстановления после теста.

Функциональные резервы сердечно-сосудистой системы оценивали на основе определения пульсовой суммы работы (площадь под кривой ЧСС за весь ТИС) и пульсовой суммы восстановления (площадь под кривой ЧСС за 5 мин восстановления после теста). ЧСС фиксировали каждые 10 с теста, затем путем суммирования всех значений за время работы рассчитывали «пульсовую сумму работы» и за время восстановления (5 мин) — «пульсовую сумму восстановления».

Показатель «пульсовой долг» рассчитывали, как разность количества сердечных сокращений в периоде восстановления и количества сердечных сокращений в состоянии относительного покоя [24]. Этот показатель отражает физиологические и метаболические перестройки после выполнения физической нагрузки. Определяли также такой показатель, как Δ ЧСС, который отражает разность между максимальной ЧСС и ЧСС в покое.

Статистическая обработка данных была произведена при помощи программы Minitab 19.1 (США) и включала проверку нормальности распределений в выборках по критерию Шапиро–Уилка, расчет индивидуальных средних значений и дисперсии показателей (one-way ANOVA). Статистически значимыми результаты считали при $p < 0,05$ по критерию Фишера или тесту Тьюки. Для обсуждения представлены только значимые различия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

До космического полета различия между группами по всем изученным показателям отсутствовали. Значительные различия ЧСС на каждой ступени нагрузки после полета по сравнению с предполетными данными обнаружены в группе А, ЧСС увеличилась на ступенях от 5 до 8 км/ч. В группе Б значимых изменений по этому показателю до и после полета зарегистрировано не было (рис. 1). Различия между группами А и Б по показателю ЧСС после космического полета (КП) во время ТИС не обнаружены.

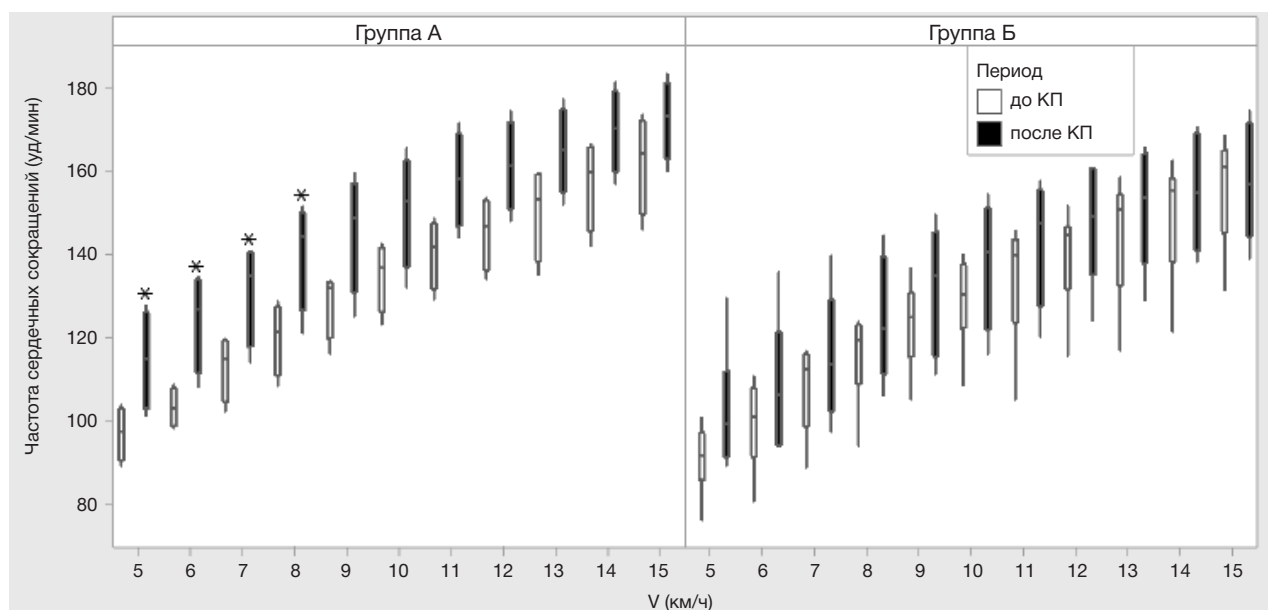


Рис. 1. Частота сердечных сокращений в ТИС до и после космического полета. * — по сравнению с предполетным уровнем в группе значение $p < 0,05$

Значительное повышение легочной вентиляции на каждой ступени нагрузки от 8 до 15 км/ч по сравнению с предполетными значениями наблюдали в группе А (рис. 2). В группе Б легочная вентиляция оказалась выше по сравнению с предполетными значениями только на ступенях нагрузки 9 и 10 км/ч. Различий между группами при сравнении легочной вентиляции на каждой ступени нагрузки после КП не обнаружено.

В группе А после космического полета наблюдали повышение концентрации лактата в капиллярной крови на первой минуте восстановления ($5,3 \pm 1,6$ до полета и $8,5 \pm 3,4$ ммоль/л после полета ($p = 0,03$)), а в группе Б значимых различий с предполетным значением этого показателя не обнаружено (с $5,3 \pm 2,7$ до полета и $6,7 \pm 3,4$ ммоль/л после полета). Мы полагаем, что повышение уровня лактата в капиллярной крови свидетельствует о несовершенстве процессов, обеспечивающих утилизацию этого метаболита при выполнении физической нагрузки в группе А, и, соответственно, о снижении уровня физической работоспособности после КП (рис. 3).

На завершающем этапе полета (140–156 сутки) обнаружены различия между группами по пульсовой сумме работы. В группе А она (17897 ± 529) оказалась на 19,4% выше, чем в группе Б (14678 ± 3148) ($p = 0,009$).

После полета пульсовая сумма работы в группе А оказалась выше по сравнению с фоновым значением до выполнения космической миссии — 16475 ± 1257 и 19143 ± 1972 соответственно ($p = 0,02$), в то время как в группе Б значимых различий не обнаружено — до полета — 14983 ± 1572 , после полета — 16148 ± 2651 (рис. 4).

Пульсовая сумма восстановления на заключительном этапе полета в группе А оказалась выше, чем в группе Б (2838 ± 188 и 2181 ± 490 , $p = 0,009$) (рис. 5).

После полета пульсовая сумма восстановления в группе А составила 3027 ± 405 , что выше, чем показатель в этой группе до полета 2575 ± 326 ($p = 0,03$), и выше, чем в группе Б после полета 2599 ± 350 ($p = 0,02$).

Анализ пульсового долга, потребления кислорода, выделения углекислого газа и максимальной частоты дыхания до и после космического полета не выявил значимых различий между группами и внутри групп.

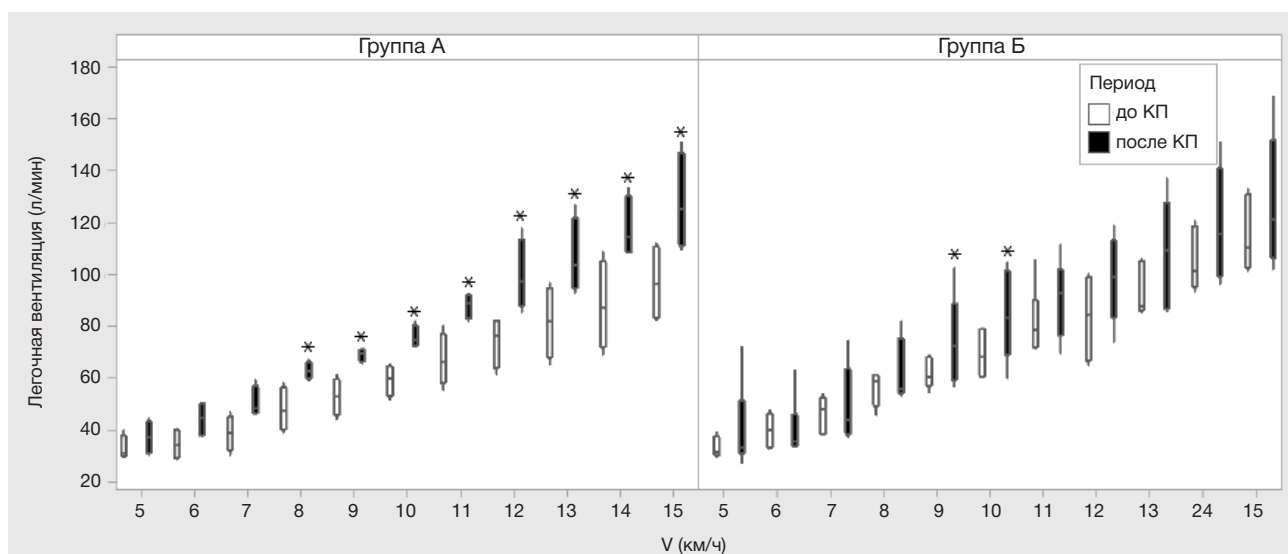


Рис. 2. Легочная вентиляция до и после космического полета в ТИС. * — по сравнению с предполетным уровнем в группе значение $p < 0,05$

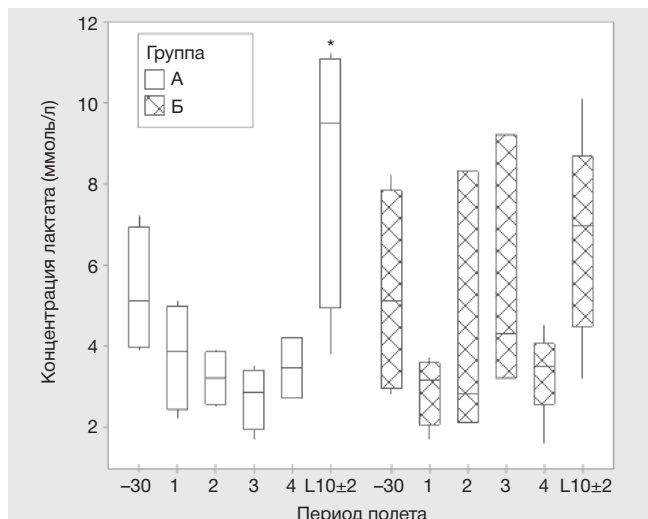


Рис. 3. Концентрация лактата капиллярной крови на первой минуте восстановления после ТИС. * — по сравнению с предполетным уровнем в группе значение $p < 0,05$; 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки и 4 — 140–156 сутки полета

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно нашей гипотезе, эффективность профилактики негативных влияний невесомости обеспечивается степенью воспроизведения эффектов пребывания в условиях действия силы тяжести. Если в результате реализации профилактических мероприятий интенсивность сенсорного притока от рецепторов внешней и внутренней среды сопоставима с таковой в условиях Земли, то обеспечивается запуск механизмов функционирования гравитационно-зависимых систем на уровне, близком к условиям действия силы тяжести. Наиболее аккуратно воспроизведения эффектов действия силы тяжести можно достигнуть при выполнении бега на дорожке с использованием специального тренировочно-нагрузочного костюма, имитирующего весовое нагружение по вертикальной оси в диапазоне 60–70% от веса тела на Земле. Когда человек стоит или выполняет локомоции на бегущей дорожке, производится работа, однако ее интенсивность в условиях космического полета значительно ниже, чем в условиях Земли. В первую очередь, это обусловлено величиной нагружения, не превышающей обычно 70% от веса тела человека на Земле. Ранее нами было показано, что величина опорных реакций, согласующаяся с массой тела в условиях гравитации 1G, соответствует бегу со скоростью 7 км/ч в условиях космического полета [21]. Таким образом, для запуска физиологических механизмов вегетативного обеспечения мышечной деятельности, близких к условиям Земли, требуется выполнение бега с высокой скоростью. Очевидно, что чем больше физическая нагрузка, тем выше и физиологическая нагрузка. Если тело человека не только удерживается в вертикальном положении, противодействуя силам, имитирующим силу тяжести с помощью тренировочно-нагрузочного костюма, но и перемещается в пространстве, то физиологическая нагрузка возрастает и профилактический эффект повышается. Исходя из вышесказанного, было высказано предположение о том, что доля быстрого бега будет играть роль в сохранении физической работоспособности человека после длительного пребывания в условиях невесомости.

Ранее нами была показана более высокая профилактическая эффективность локомоторных

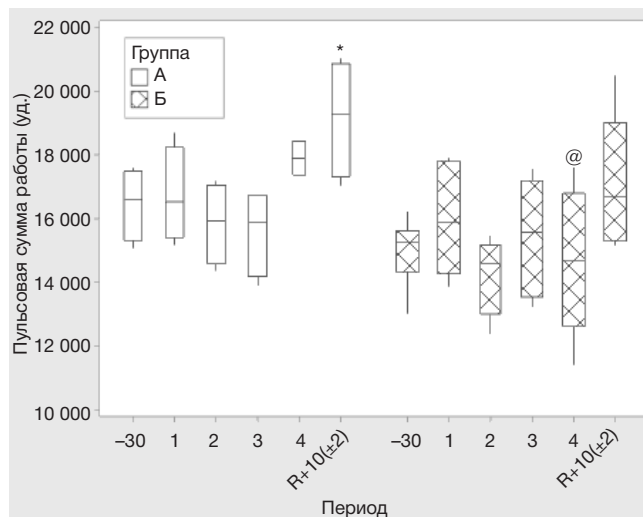


Рис. 4. Пульсовая сумма работы в ТИС. * — $p < 0,05$ в сравнении с фоновым значением группы; @ — $p < 0,05$ в сравнении со значением того же периода полета в группе А; 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки и 4 — 140–156 сутки полета

тренировок переменным методом в сравнении с равномерным бегом [25], где интервалы бега с высокой скоростью чередовались с интервалами ходьбы, что согласуется с результатами, полученными позднее с участием астронавтов [26], и настоящим исследованием, где после космического полета в группе с низким объемом быстрого бега в полете уровень лактата капиллярной крови на первой минуте восстановления после локомоторной нагрузки оказался повышен. Увеличение уровня лактата крови указывает на то, что испытуемый находится в неустойчивом метаболическом состоянии, сопровождающемся смещением кислотно-щелочного баланса внутренней среды организма, что может быть сопряжено с нарушением работы нервных центров, снижением активности ферментных систем, и, как следствие, угнетением работы мышц [27–29]. В группе с большим объемом быстрого бега концентрация лактата в капиллярной крови в восстановительном периоде после теста оказалась на предполетном уровне, что в соответствии с представлениями спортивной физиологии означает сохранение аэробных механизмов

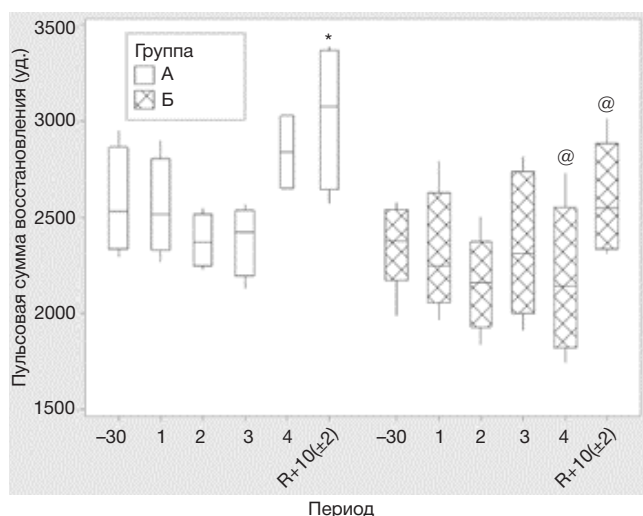


Рис. 5. Пульсовая сумма восстановления после ТИС. * — $p < 0,05$ в сравнении с фоновым значением группы; @ — $p < 0,05$ в сравнении со значением соответствующего периода полета в группе А; 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки и 4 — 140–156 сутки полета

энергообеспечения мышечной деятельности и способности к утилизации лактата [30]. Тренировки с большей долей бега с высокой скоростью позволили запустить физиологические механизмы, сохраняющие емкость системы аэробного энергообеспечения мышечной деятельности и, как следствие, переход к анаэробным механизмам при выполнении ступенчато-возрастающей нагрузки осуществлялся на более поздних этапах теста. Соответственно, отсутствовало значительное накопление лактата, являющегося продуктом гликолитической системы обеспечения мышечной деятельности.

Результаты, свидетельствующие о повышении легочной вентиляции на ступенях нагрузки с 8 до 15 км/ч на 10 ± 2 сутки после космического полета по сравнению с предполетным тестом, согласуются с данными о повышенном уровне лактата капиллярной крови и указывают на перенапряжение кислородтранспортной системы в группе с низким объемом быстрого бега в полете. Повышение легочной вентиляции на 10-е сутки после длительного космического полета было описано и у астронавтов в тесте на велоэргометре [18, 31].

Результаты настоящего исследования уточняют представления о механизмах противодействия негативному влиянию невесомости. Эффективность тренировок переменным методом, описанная ранее [25], обеспечивается включением систем вегетативного обеспечения мышечной деятельности при быстром переходе от малоинтенсивной локомоторной нагрузки к высокоинтенсивной. В настоящей работе принимали во внимание только дистанцию, преодолеваемую со скоростью более 9 км/ч, без учета переходов от малоинтенсивной работы к высокоинтенсивной. Мы предполагаем, что бег с высокой скоростью при осевой нагрузке около 70% от веса тела оказывается эффективным методом профилактики негативных влияний невесомости, так как такая нагрузка сопоставима по энергозатратам и величине сенсорного притока с поддержанием тела в вертикальном положении или выполнением человеком медленной ходьбы в условиях Земли. Таким образом, бег со скоростью более 9 км/ч, по нашему предположению, обеспечивает запуск гравитационно-зависимых физиологических механизмов благодаря имитации эффектов действия силы тяжести в условиях Земли.

Сравнительный анализ эффективности мероприятий для профилактики негативных влияний невесомости в условиях космического полета имеет ряд очевидных ограничений. Возможен ретроспективный анализ эффективности тренажеров, применявшихся ранее, такие знания полезны с практической точки зрения, так как

некоторые средства сохраняются на МКС как резервные [32]. Более широкие возможности предоставляют наземные модельные эксперименты, в которых воспроизводятся некоторые эффекты космического полета. Одна из таких моделей — антиортостатическая гипокинезия (АНОГ) — постельный режим с наклоном головы вниз на 6° , в рамках подобных исследований возможно получение данных о профилактике негативных эффектов гипокинезии [33, 34]. В эксперименте с 90-дневной АНОГ показана наиболее высокая эффективность тренировок на вертикальной беговой дорожке с величиной осевой нагрузки около 80% от веса тела и с интенсивностью 80–90% от максимального потребления кислорода в сочетании с силовыми тренировками высокой интенсивности [34], что согласуется с результатами космического эксперимента, полученными нами.

В результате нашего исследования определены новые прогностические показатели в ТИС — это пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления, повышение которых в ходе космического полета сопровождалось более низким уровнем физической работоспособности после полета. Профилактика негативных влияний невесомости станет более эффективной в случае учета этих показателей при сопровождении тренировочного процесса. В интересах освоения дальнего космоса планируются исследования протекания процессов реадaptации к условиям Земли в более раннем послеполетном периоде в сопоставлении с особенностями применения методов профилактики в орбитальном полете.

ВЫВОДЫ

Предотвращение негативных влияний длительного пребывания в невесомости может быть более эффективным при увеличении объема бега со скоростью более 9 км/ч.

Стандартная ступенчато-возрастающая локомоторная нагрузка в активном режиме движения полотна с регистрацией параметров функционирования кардиореспираторной системы информативна для прогнозирования уровня работоспособности после длительного космического полета.

Предложены новые предикторы уровня работоспособности космонавта после длительного космического полета — пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления в стандартном локомоторном тесте со ступенчато-возрастающей нагрузкой.

Литература

1. Lee SM, Scheuring RA, Guillems ME, Kerstman EL. Physical performance, countermeasures, and postflight reconditioning. *Principles of clinical medicine for spaceflight*. 2019; 609–58.
2. Stepanek J, Blue RS, Parazynski S. Space medicine in the era of civilian spaceflight. *New England Journal of Medicine*. 2019; 380 (11): 1053–60.
3. Baker ES, Barratt MR, Sams CF, Wear ML. Human response to space flight. *Principles of clinical medicine for spaceflight*. 2019; 367–411.
4. Grimm D. Microgravity and space medicine. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22 (13): 6697.
5. Navasolava N, Yuan M, Murphy R, Robin A, Coupé M, Wang L, et al. Vascular and microvascular dysfunction induced by microgravity and its analogs in humans: mechanisms and countermeasures. *Frontiers in physiology*. 2020; 11: 952.
6. Gallo C, Ridolfi L, Scarsoglio S. Cardiovascular deconditioning during long-term spaceflight through multiscale modeling. *npj Microgravity*. 2020; 6 (1): 27.
7. Pramanik J, Kumar A, Panchal L, Prajapati B. Countermeasures for Maintaining Cardiovascular Health in Space Missions. *Current Cardiology Reviews*. 2023; 19 (5): 57–67.
8. Vernice NA, Meydan C, Afshinnekoo E, Mason CE. Long-term spaceflight and the cardiovascular system. *Precision Clinical Medicine*. 2020; 3 (4): 284–91.
9. Jirak P, Mirna M, Rezar R, Motloch LJ, Lichtenauer M, Jordan J, et al. How spaceflight challenges human cardiovascular health.

- European journal of preventive cardiology. 2022; 29 (10): 1399–411.
10. Sayed AH, Hargens AR. Cardiovascular physiology and fluid shifts in space. Spaceflight and the central nervous system: clinical and scientific aspects. Cham: Springer International Publishing. 2023; 9–21.
 11. Prisk GK. Pulmonary challenges of prolonged journeys to space: taking your lungs to the moon. Medical Journal of Australia. 2019; 211 (6): 271–6.
 12. Genah S, Monici M, Morbidelli L. The effect of space travel on bone metabolism: Considerations on today's major challenges and advances in pharmacology. International Journal of Molecular Sciences. 2021; 22 (9): 4585.
 13. Juhl IV OJ, Buettmann EG, Friedman MA, DeNapoli RC, Hoppock GA, Donahue HJ. Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system. npj Microgravity. 2021; 7 (1): 28.
 14. Shenkman BS, Kozlovskaya IB. Cellular responses of human postural muscle to dry immersion. Frontiers in Physiology. 2019; 10: 187.
 15. Comfort P, McMahon JJ, Jones PA, Cuthbert M, Kendall K, Lake JP, et al. Effects of spaceflight on musculoskeletal health: a systematic review and meta-analysis, considerations for interplanetary travel. Sports Medicine. 2021; 51: 2097–114.
 16. Macaulay TR, Peters BT, Wood SJ, Clement GR, Oddsson L, Bloomberg JJ. Developing proprioceptive countermeasures to mitigate postural and locomotor control deficits after long-duration spaceflight. Frontiers in Systems Neuroscience. 2021; 15: 658985.
 17. Tays GD, Hupfeld KE, McGregor HR, Salazar AP, De Dios YE, Beltran NE, et al. The effects of long duration spaceflight on sensorimotor control and cognition. Frontiers in neural circuits. 2021; 15: 723504.
 18. Scott JM, Feiveson AH, English KL, Spector ER, Sibonga JD, Dillon EL, et al. Effects of exercise countermeasures on multisystem function in long duration spaceflight astronauts. npj Microgravity. 2023; 9 (1): 11.
 19. Petersen N, Jaekel P, Rosenberger A, Weber T, Scott J, Castrucci F, et al. Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS. Extreme physiology & medicine. 2016; 5 (1): 1–13.
 20. Rivas E, Strock N, Dillon EL, Frisco D. Risk of impaired performance due to reduced muscle mass, strength & endurance (short title: muscle) and risk of reduced physical performance capabilities due to reduced aerobic capacity (short title: aerobic). Evidence Report. 2023; 96–106.
 21. Фомина Е. В., Лысова Н. Ю., Савинкина А. О. Осевая нагрузка при выполнении локомоторных тренировок в условиях невесомости как фактор эффективности профилактики гипогравитационных нарушений. Физиология человека. 2018; 44 (1): 56–63.
 22. Степанцов В. И., Тихонов М. А., Еремин А. В. Физическая тренировка как метод предупреждения гиподинамического синдрома. Космич. биол. и авиакосм. мед. 1972; 6: 64–69.
 23. Koschate J, Hoffmann U, Lysova N, Thieschäfer L, Drescher U, Fomina E. Acquisition of cardiovascular kinetics via treadmill exercise—a tool to monitor physical fitness during space missions. Acta Astronautica. 2021; 186: 280–8.
 24. Волков Н. И., Попов О. И., Самборский А. Г. Пульсовые критерии энергетической стоимости упражнения. Физиология человека. 2003; 29 (3): 98–103.
 25. Popov D, Khusnutdinova D, Shenkman B, Vinogradova O, Kozlovskaya I. Dynamics of physical performance during long-duration space flight (first results of "Countermeasure" experiment). Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology. 2004; 11 (2): 231–2.
 26. English KL, Downs M, Goetchius E, Buxton R, Ryder JW, Ploutz-Snyder R, et al. High intensity training during spaceflight: results from the NASA Sprint Study. npj Microgravity. 2020; 6 (1): 21.
 27. Brooks GA. The science and translation of lactate shuttle theory. Cell metabolism. 2018; 27 (4): 757–85.
 28. Poole DC, Rossiter HB, Brooks GA, Gladden LB. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. The Journal of physiology. 2021; 599 (3): 737–67.
 29. Гунина Л. М., Рыбина И. Л., Санауов Ж. Контроль и управление тренировочным процессом с помощью комплекса лабораторных маркеров. Science in Olympic Sports. 2020; 2: 33–43.
 30. Szanto S, Mody T, Gyurcsik Z, Babjak LB, Somogyi V, Barath B, et al. Alterations of selected hemorheological and metabolic parameters induced by physical activity in untrained men and sportsmen. Metabolites. 2021; 11 (12): 870.
 31. Moore Jr AD, Downs ME, Lee SM, Feiveson AH, Knudsen P, Ploutz-Snyder L. Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight. Journal of applied physiology. 2014; 117 (3): 231–8.
 32. Scott JP, Weber T, Green DA. Introduction to the Frontiers research topic: optimization of exercise countermeasures for human space flight—lessons from terrestrial physiology and operational considerations. Frontiers in physiology. 2019; 10: 173.
 33. Hedge ET, Patterson CA, Mastrandrea CJ, Sonjak V, Hajj-Boutros G, Faust A, et al. Implementation of exercise countermeasures during spaceflight and microgravity analogue studies: developing countermeasure protocols for bedrest in older adults (BROA). Frontiers in Physiology. 2022; 13: 928313.
 34. Wang L, Li Z, Liu S, Zhang J, Dai X, Dai Z, et al. The Astronaut Center of China 90-d head-down bed rest: overview, countermeasures, and effects. Space: Science & Technology. 2023; 3: 0023.

References

1. Lee SM, Scheuring RA, Williams ME, Kerstman EL. Physical performance, countermeasures, and postflight reconditioning. Principles of clinical medicine for spaceflight. 2019; 609–58.
2. Stepanek J, Blue RS, Parazynski S. Space medicine in the era of civilian spaceflight. New England Journal of Medicine. 2019; 380 (11): 1053–60.
3. Baker ES, Barratt MR, Sams CF, Wear ML. Human response to space flight. Principles of clinical medicine for spaceflight. 2019; 367–411.
4. Grimm D. Microgravity and space medicine. International Journal of Molecular Sciences. 2021; 22 (13): 6697.
5. Navasolava N, Yuan M, Murphy R, Robin A, Coupé M, Wang L, et al. Vascular and microvascular dysfunction induced by microgravity and its analogs in humans: mechanisms and countermeasures. Frontiers in physiology. 2020; 11: 952.
6. Gallo C, Ridolfi L, Scarsoglio S. Cardiovascular deconditioning during long-term spaceflight through multiscale modeling. npj Microgravity. 2020; 6 (1): 27.
7. Pramanik J, Kumar A, Panchal L, Prajapati B. Countermeasures for Maintaining Cardiovascular Health in Space Missions. Current Cardiology Reviews. 2023; 19 (5): 57–67.
8. Vernice NA, Meydan C, Afshinnekoo E, Mason CE. Long-term spaceflight and the cardiovascular system. Precision Clinical Medicine. 2020; 3 (4): 284–91.
9. Jirak P, Mirna M, Rezar R, Motloch LJ, Lichtenauer M, Jordan J, et al. How spaceflight challenges human cardiovascular health. European journal of preventive cardiology. 2022; 29 (10): 1399–411.
10. Sayed AH, Hargens AR. Cardiovascular physiology and fluid shifts in space. Spaceflight and the central nervous system: clinical and scientific aspects. Cham: Springer International Publishing. 2023; 9–21.
11. Prisk GK. Pulmonary challenges of prolonged journeys to space: taking your lungs to the moon. Medical Journal of Australia. 2019; 211 (6): 271–6.
12. Genah S, Monici M, Morbidelli L. The effect of space travel on bone metabolism: Considerations on today's major challenges and advances in pharmacology. International Journal of Molecular

- Sciences. 2021; 22 (9): 4585.
13. Juhl IV OJ, Buettmann EG, Friedman MA, DeNapoli RC, Hoppock GA, Donahue HJ. Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system. *npj Microgravity*. 2021; 7 (1): 28.
 14. Shenkman BS, Kozlovskaya IB. Cellular responses of human postural muscle to dry immersion. *Frontiers in Physiology*. 2019; 10: 187.
 15. Comfort P, McMahon JJ, Jones PA, Cuthbert M, Kendall K, Lake JP, et al. Effects of spaceflight on musculoskeletal health: a systematic review and meta-analysis, considerations for interplanetary travel. *Sports Medicine*. 2021; 51: 2097–114.
 16. Macaulay TR, Peters BT, Wood SJ, Clement GR, Oddsson L, Bloomberg JJ. Developing proprioceptive countermeasures to mitigate postural and locomotor control deficits after long-duration spaceflight. *Frontiers in Systems Neuroscience*. 2021; 15: 658985.
 17. Tays GD, Hupfeld KE, McGregor HR, Salazar AP, De Dios YE, Beltran NE, et al. The effects of long duration spaceflight on sensorimotor control and cognition. *Frontiers in neural circuits*. 2021; 15: 723504.
 18. Scott JM, Feiveson AH, English KL, Spector ER, Sibonga JD, Dillon EL, et al. Effects of exercise countermeasures on multisystem function in long duration spaceflight astronauts. *npj Microgravity*. 2023; 9 (1): 11.
 19. Petersen N, Jaekel P, Rosenberger A, Weber T, Scott J, Castrucci F, et al. Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS. *Extreme physiology & medicine*. 2016; 5 (1): 1–13.
 20. Rivas E, Strock N, Dillon EL, Frisco D. Risk of impaired performance due to reduced muscle mass, strength &, endurance (short title: muscle) and risk of reduced physical performance capabilities due to reduced aerobic capacity (short title: aerobic). *Evidence Report*. 2023; 96–106.
 21. Fomina EV, Lysova NU, Savinkina AO. Axial load during the performance of locomotor training in microgravity as a factor of hypogravity countermeasure efficiency. *Human Physiology*. 2018; 44 (1): 56–63. Russian.
 22. Stepantsov VI, Tikhonov MA, Eremin AV. Fizicheskaya trenirovka kak metod preduprezhdeniya gipodinamicheskogo sindroma. *Kosmich. biol. i aviakosm. med.* 1972; 6: 64–9. Russian.
 23. Koschate J, Hoffmann U, Lysova N, Thieschäfer L, Drescher U, Fomina E. Acquisition of cardiovascular kinetics via treadmill exercise—a tool to monitor physical fitness during space missions. *Acta Astronautica*. 2021; 186: 280–8.
 24. Volkov NI, Popov OI, Samborskii AG. Pulse rate criteria for determining the energy cost of exercise. *Human Physiology*. 2003; 29 (3): 98–103. Russian.
 25. Popov D, Khusnutdinova D, Shenkman B, Vinogradova O, Kozlovskaya I. Dynamics of physical performance during long-duration space flight (first results of "Countermeasure" experiment). *Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology*. 2004; 11 (2): 231–2.
 26. English KL, Downs M, Goetchius E, Buxton R, Ryder JW, Ploutz-Snyder R, et al. High intensity training during spaceflight: results from the NASA Sprint Study. *npj Microgravity*. 2020; 6 (1): 21.
 27. Brooks GA. The science and translation of lactate shuttle theory. *Cell metabolism*. 2018; 27 (4): 757–85.
 28. Poole DC, Rossiter HB, Brooks GA, Gladden LB. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *The Journal of physiology*. 2021; 599 (3): 737–67.
 29. Gunina LM, Rybina IL, Sanauov Zh. Training process control and management using laboratory marker complex. *Science in Olympic Sports*. 2020; 2: 33–43. Russian.
 30. Szanto S, Mody T, Gyurcsik Z, Babjak LB, Somogyi V, Barath B, et al. Alterations of selected hemorheological and metabolic parameters induced by physical activity in untrained men and sportsmen. *Metabolites*. 2021; 11 (12): 870.
 31. Moore Jr AD, Downs ME, Lee SM, Feiveson AH, Knudsen P, Ploutz-Snyder L. Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight. *Journal of applied physiology*. 2014; 117 (3): 231–8.
 32. Scott JP, Weber T, Green DA. Introduction to the Frontiers research topic: optimization of exercise countermeasures for human space flight—lessons from terrestrial physiology and operational considerations. *Frontiers in physiology*. 2019; 10: 173.
 33. Hedge ET, Patterson CA, Mastrandrea CJ, Sonjak V, Haji-Boutros G, Faust A, et al. Implementation of exercise countermeasures during spaceflight and microgravity analogue studies: developing countermeasure protocols for bedrest in older adults (BROA). *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 928313.
 34. Wang L, Li Z, Liu S, Zhang J, Dai X, Dai Z, et al. The Astronaut Center of China 90-d head-down bed rest: overview, countermeasures, and effects. *Space: Science & Technology*. 2023; 3: 0023.