



УДК 612.766.1 : 621.45.026.5

Программно-технические средства профилактики негативных эффектов невесомости, воздействующей на космонавтов в условиях орбитальных полетов

М. А. Кокуева, Е. В. Фомина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ - ИМБП РАН), Москва, Россия

Аннотация

Актуальность Длительное пребывание в невесомости вызывает серьезные нарушения функций физиологических систем организма: перераспределение жидкостей в краниальном направлении, потерю костной и мышечной массы, снижение аэробной работоспособности и ортостатической устойчивости, космическую болезнь движения. Эти эффекты затрудняют реадаптацию к условиям Земной гравитации и представляют критический риск для будущих межпланетных миссий (на Луну, Марс), где оказание помощи экипажу на месте посадки невозможно.

Цель. Систематизировать современные программно-технические средства профилактики негативных эффектов невесомости, применяемые в настоящее время на Международной космической станции (МКС), с акцентом на российский сегмент, и оценить их эффективность.

Методы. Сравнительный анализ российских (БД-2, ВБ-3М, «Чибис» и др.) и международных (ARED, CEVIS, T2) профилактических средств на МКС и обзор тренировочных методик (российской системы профилактики негативных влияний невесомости с акцентом на выполнение естественных локомоций (ходьбы и бега) и программы NASA с преобладанием силовых нагрузок).

Результаты. Основой профилактики гипогравитационных нарушений являются физические тренировки:

- на «бегущей дорожке» с аксиальным нагружением - ключевое средство для сохранения функций сердечно-сосудистой системы, аэробной выносливости, ортостатической устойчивости и способности к выполнению естественных локомоций - ходьбы и бега. Особенно эффективны бег в «пассивном» режиме движения полотна «бегущей дорожки» и быстрый бег;

- на силовом тренажере - наиболее эффективное средство против потери костной массы и мышечной атрофии (основное тренировочное средство NASA);

- на велоэргометре - поддерживают аэробные/анаэробные возможности организма.

Дополнительными средствами в российской системе профилактики невесомости являются: окклюзионные манжеты, используемые на начальном этапе полёта; миостимуляторы и компенсатор опорной разгрузки, которые используются по желанию космонавта в ходе полёта; костюм для создания отрицательного давления на нижнюю часть тела (пневмова-

куумный костюм «Чибис»), используемый на заключительном этапе полёта; водно-солевые добавки и противоперегрузочный костюм «Кентавр».

При сравнении подходов было выявлено, что российская система фокусируется на выполнении естественных локомоций - ходьбы и бега на «бегущей дорожке», а система партнеров NASA – преимущественно на упражнениях на велоэргометре (велоэргометр CEVIS) и силовых тренировках (силовой тренажер ARED).

Заключение. Существующие средства и методы профилактики, в основе которых лежит выполнение физических тренировок на специальных тренажёрах, существенно смягчают негативные эффекты невесомости на МКС. Российский подход к профилактике негативных влияний невесомости заключается в преимущественном выполнении естественных локомоций - ходьбы и бега, с акцентом на быстрый бег и бег в «пассивном» режиме движения полотна «бегущей дорожки». Иностранные партнёры по МКС делают упор на выполнение велотренировок и силовых тренировок. Тем не менее, проблема защиты организма человека от негативного влияния невесомости не решена полностью, ни одна система не гарантирует полного предотвращения физиологических сдвигов и быстрой реадаптации. Для будущих межпланетных миссий необходима дальнейшая оптимизация протоколов тренировок и разработка новых методик дозирования и корректирования нагрузки с использованием современных информационных технологий.

Ключевые слова: профилактика негативных эффектов невесомости, физические тренировки, «бегущая дорожка» БД-2, силовой тренажёр ARED, искусственный интеллект в космической медицине

Software and hardware tools for preventing the negative effects of weightlessness affecting astronauts during orbital flights

M. A. Kokueva, E. V. Fomina

State Scientific Center of Russian Federation — Institute of Bio-Medical Problems of the Russian Academy of Sciences (SSC RF — IBMP RAS), Moscow, Russia

Abstract

Relevance. Prolonged exposure to weightlessness causes serious violations of the functions of the physiological systems of the body: redistribution of fluids in the cranial direction, loss of bone and muscle mass, decreased aerobic performance, orthostatic intolerance, space motion sickness. These effects make it difficult to adapt to the conditions of Earth's gravity and pose a critical risk for future interplanetary missions (to the Moon, Mars), where assistance to the crew at the landing site is impossible.

Goal. To systematize modern software and hardware tools for the prevention of negative effects of weightlessness currently used on the International Space Station (ISS), with an emphasis on the Russian segment, and to evaluate their effectiveness.

Methods. Comparative analysis of Russian (BD-2, WB-3M, "Chibis", etc.) and international (ARED, CEVIS, T2) preventive measures on the ISS and a review of training techniques

(the Russian system for preventing the negative effects of weightlessness with an emphasis on natural locomotion (walking and running) and NASA programs with a predominance of strength training).

Results. Physical training is the basis for the prevention of negative effects of weightlessness:

- on a treadmill with axial loading, it is a key tool for maintaining the functions of the cardiovascular system, aerobic performance, orthostatic stability and the ability to perform natural locomotion - walking and running. Running in the "passive" mode of treadmill movement and fast running are especially effective; on a strength trainer - the most effective remedy against bone loss and muscle atrophy (the main training tool of NASA);

- on the bicycle ergometer - they support the aerobic/anaerobic capabilities.

Additional means in the Russian countermeasure system are: occlusal cuffs used at the initial stage of the flight; muscle stimulators and a support unloading compensator, which are used at the request of the cosmonaut during the flight; a suit for creating negative pressure on the lower body (pneumatic vacuum suit "Chibis"), used at the final stage of the flight; water-salt additives and an anti-overload The Centaur anti-g suit.

When comparing the approaches, it was revealed that the Russian system focuses on performing natural locomotion - walking and running on a treadmill, while the system of NASA partners focuses on cycling (CEVIS cycle ergometer) and strength training (ARED strength trainer).

Conclusions. Existing means and methods of prevention of negative effects of microgravity, based on performing physical training on special simulators, significantly mitigate the negative effects of weightlessness on the ISS. The Russian approach to preventing the negative effects of weightlessness consists primarily in performing natural locomotion - walking and running, with an emphasis on fast running and running in the "passive" mode of treadmill. The international partners on the ISS focus on performing cycling and strength training. Nevertheless, the problem of protecting the human body from the negative effects of weightlessness has not been completely solved, no system guarantees complete prevention of physiological changes and rapid readaptation to gravity. For future interplanetary missions, it is necessary to further optimize training protocols and develop new methods of dosing and load adjustment using modern information technologies.

Keywords: prevention of negative effects of weightlessness, physical exercise, BD-2 treadmill, ARED resistance trainer, artificial intelligence in space medicine

Введение

Современная пилотируемая космонавтика даёт уникальную возможность для создания научного задела, необходимого для будущего освоения дальнего космоса. Условия полётов за пределы орбиты Земли будут кардинально отличаться от тех, с которыми учёные и инженеры сталкиваются в орбитальных полётах. Новыми вызовами станут: радиация, гипомагнитная среда, высокий уровень автономности полёта. Невозможность оперативно эвакуировать космонавтов на Землю в случае нештатных ситуаций, в том числе медицинских, ставит новые задачи перед системой медицинского обеспечения космических полётов, в частности перед системой профилактики неблагоприятных эффектов невесомости. Медицинское обеспечение в автономном полёте должно базироваться на широком применении искусственного интеллекта, представляя собой «интеллектуальный

телемедицинский контур» [1]. При этом и в орбитальных полётах существуют серьёзные риски снижения работоспособности и потери здоровья. Уже после первых длительных орбитальных полётов стало ясно, что пребывание в невесомости оказывает выраженные негативные эффекты на организм человека. При обследовании космонавтов А.Г. Николаева и В.И. Севастьянова после 18-суточного космического полёта без применения средств профилактики были выявлены существенные изменения в состоянии сердечно-сосудистой и опорно-двигательной систем. В течение трёх часов после приземления космонавтам было трудно сохранять вертикальную позу, незначительные нагрузки вызывали резкий рост частоты сердечных сокращений. В течение 3-4 суток после приземления Земная гравитация воспринималась космонавтами как воздействие перегрузок 2-2,5 g. Ортостатическая устойчивость была снижена, и на 10-е сутки после приземления только начала приближаться к дополётным значениям [2].

В данной статье приводится обзор негативных последствий пребывания человека в невесомости, а также средств и методов их профилактики негативных последствий, которые используются в настоящее время. Анализируются перспективные направления совершенствования профилактики негативных эффектов невесомости, в том числе с использованием современных информационных технологий.

Физиологические эффекты влияния гипогравитации (невесомости) на организм человека

В космическом полёте организм человека подвергается воздействию различных неблагоприятных факторов, основным из которых является состояние невесомости [3, 4, 5, 6]. При переходе в условия невесомости происходит перераспределение жидкости в краниальном направлении, возникают синдромы одутловатого лица и «птичьих» ног. Зарегистрировано семикратное увеличение площади поперечного сечения левой внутренней яремной вены к 50-м суткам полёта по сравнению с дополётными значениями, полученными в положении сидя, с дальнейшим смягчением эффекта до шестикратного увеличения к 150-м суткам полёта по сравнению с предполётными значениями [4]. Примерно на четверть увеличивается объём крови в лёгочных капиллярах. В первые двое суток полёта увеличиваются венозный возврат, ударный объём и сердечный выброс [5]. В первые 3-5 дней полёта наряду с отёком лица наблюдается заложенность носа, головная боль. По прошествии двух недель космического полёта эти симптомы исчезают, что связано с увеличением объёма выделяемой мочи и уменьшением объёма плазмы крови. Соразмерно уменьшению объёма плазмы уменьшается также объём эритроцитов [7]. Систолическое, диастолическое и среднее давление остаётся сниженным на 8–10 mmHg в ходе всего полёта. Ударный объём остаётся увеличенным на $41 \pm 9\%$ по сравнению с фоновыми данными, а также превышает зарегистрированные в коротких полётах значения, где снижение составляет $22 \pm 8\%$ [8]. Перечисленные изменения в комплексе приводят к снижению максимального потребления кислорода (МПК) – интегрального показателя аэробной физической работоспособности. В первые две недели полёта зарегистрировано снижение МПК на 17% с последующим увеличением в течение миссии, но к дополётным значениям показатель так и не возвращался, а после полёта в течение первых 48 часов был снижен на 15%. Подобная динамика наблюдалась и при определении уровня аэробной работоспособности при выполнении физической нагрузки субмаксимальной мощности, её послеполётный уровень не восстанавливался до фонового в течение 3-5 дней [9].

В полёте происходят деминерализация костной ткани, атрофия и структурные изменения в мышечном аппарате, снижение ортостатической устойчивости и общей трудоспособности [10]. В первые 6-9 дней космического полёта наблюдается быстрая потеря объёма мышечной ткани: 6% в четырёхглавой мышце, 6% в икроножной и 10% в мышцах спины. Длительные космические полёты приводят к более выраженному уменьшению объёма этих мышц – на 13, 12 и 20 % соответственно. Вероятной причиной является снижение синтеза мышечных белков [11]. Изменения в костной системе и нарушение минерального обмена в костной ткани являются неравномерными. В нижней половине скелета плотность костной ткани снижается, в верхней – увеличивается. Космонавт в среднем за месяц полёта теряет около 1% костной массы [10]. Данный процесс продолжается и по возвращении на Землю, в связи с чем необходимо в будущем учитывать возможность возникновения переломов и формирования камней в почках при освоении Луны и Марса, что является одним из рисков освоения дальнего космоса. Имеются данные по тесной взаимосвязи сигнальных путей костной и мышечной систем, из чего можно предположить, что стратегия смягчения негативных последствий невесомости для мышечной системы, применяющаяся на космических станциях, оказывает положительный эффект и на костную систему [12]. На борту Международной космической станции (МКС) показано, что использование силового тренажёра ARED является эффективным в предотвращении потерь минеральной плотности поясничных позвонков (L1-L4), шейки бедра и большого вертела. Эффективность силового тренажёра выше эффективности эспандеров [13]. У астронавтов после космического полёта отмечено снижение парасимпатических влияний; при этом известно, что преобладание парасимпатической регуляции в покое сопровождается лучшей переносимостью ортостатической пробы [14].

Пребывание в условиях невесомости вызывает изменение импульсов, идущих от отолитовых органов, что приводит к искажению их интерпретации ЦНС. У космонавта в первые часы пребывания в невесомости возникает головокружение, тошнота, рвота, потеря аппетита, головная боль, бледность кожных покровов. Такое состояние называют космической болезнью движения (КБД). Механизм возникновения КБД до конца не известен, но существует несколько гипотез, в том числе сенсорный конфликт и перераспределение жидкости в краниальном направлении. КБД может оказывать негативное влияние на операторские способности космонавтов. Для предотвращения данного состояния в системе профилактики используются фармакологические средства; предполагается также, что нахождение в условиях искусственной гравитации может предотвратить развитие космической болезни движения [15].

Средства профилактики негативных влияний невесомости

Для профилактики негативных симптомов со стороны сердечно-сосудистой, нервно-мышечной, костной систем и перестроек метаболизма в длительном космическом полёте для всех космонавтов обязательным является систематическое выполнение физических упражнений [16]. В настоящее время в российской системе профилактики негативных эффектов невесомости на российском сегменте МКС используются следующие тренировочные средства: «бегущая дорожка» БД-2, бортовой велотренажёр ВБ-3М с нагрузателем силовым, пневмовакуумный костюм «Чибиc», противоперегрузочный костюм «Кентавр», силовой тренажёр ARED (расположен на американском сегменте МКС). Данные средства

снабжены цифровой системой управления с возможностью задания определенных режимов и записью тренировки. Также используются эспандеры, окклюзионные манжеты. В качестве дополнительных средств используются миостимуляторы, компенсатор опорной разгрузки (КОР) и другие средства [12]. Перечень средств профилактики, используемых российскими космонавтами, их основные характеристики и особенности использования приведены в таблице 1.

Таблица 1: Средства профилактики, используемые российскими космонавтами на МКС

Средство профилактики	Характеристика	Назначение	Особенности использования
Основные российские средства профилактики			
«Бегущая дорожка» БД-2 (Россия)	Возможность работы в активном и пассивном режиме ходьбы и бега с системой притяга. Снабжена системой виброизоляции.	Сохранение способности к ходьбе/бегу. Поддержание аэробных возможностей, ортостатической устойчивости. Создание афферентного притока импульсов к рецепторам опоры.	Ежедневно или по схеме: 3 дня тренировки + 1 день произвольной тренировки (или день отдыха), 1 раз в день.
Велоэргометр «ВБ-3М» (Россия)	Напоминает спортивный велосипед без седла, позволяет крутить педали ногами и руками.	Поддержание аэробных, анаэробных, скоростно-силовых возможностей.	Через день, 1 раз в день.
Силовой тренажёр ARED (США)	Использует вакуумные цилиндры для создания регулируемого сопротивления (до 270 кг). Имитирует жим лёжа, приседания, тягу.	Поддержание силовых возможностей мышц.	Через день, 1 раз в день.
Велоэргометр CEVIS (США)	Снабжен системой виброизоляции. Нагрузка до 250 Вт, регулируется натяжением ремня.	Поддержание аэробных, анаэробных, скоростно-силовых возможностей.	Через день, 1 раз в день.
Бегущая дорожка T2 (США)	Электрическая беговая дорожка с системами виброизоляции, амортизации и креплениями, имитирующими вес тела.	Сохранение способности к ходьбе/бегу. Поддержание аэробных возможностей, ортостатической устойчивости. Создание афферентного притока импульсов к рецепторам опоры.	Ежедневно или по схеме: 3 дня тренировки + 1 день отдыха, 1 раз в день.

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – продолжение

Средство профилактики	Характеристика	Назначение	Особенности использования
Дополнительные российские средства профилактики			
Компенсатор опорной разгрузки («КОР»)	Обувь для механической стимуляции опорных зон стоп.	Создание афферентного притока импульсов от рецепторов опоры для имитации ходьбы.	По желанию космонавта и по рекомендации специалистов.
Миостимулятор «Стимул ВЧ»	Имеет шесть каналов электромиостимуляции.	Высокочастотная электромиостимуляция мышц нижних и верхних конечностей, спины и шеи в тренировочном и восстановительном режимах.	Используется по рекомендации специалистов.
Миостимулятор «Стимул НЧ»	Имеет шесть каналов электромиостимуляции.	Электромиостимуляционная тренировка мышц нижних конечностей и мышц спины.	Используется по рекомендации специалистов.
Костюм «Пингвин»	Костюм с эластичными вставками, создающий силовое нагружение вдоль продольной оси тела.	Восполняет недостаток нагрузки на мышцы позвоночника, препятствует растяжению позвоночника в невесомости.	Используется по рекомендации специалистов.
Нагрузатель силовой НС-1	Преобразует вращательный момент роторного диска электромагнитной муфты в силу сопротивления поступательному движению тяги.	Обеспечивает выполнение космонавтом резистивных упражнений по нагружению рук, ног и спины для поддержания их силовых возможностей.	Используется на протяжении всего полёта.
Комплект эспандеров	Использование регулируемого сопротивления (резиновых жгутов или пружин) для силовых упражнений.	Поддержание силовых возможностей мышц.	Используется на протяжении всего полёта.

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – продолжение

Средство профилактики	Характеристика	Назначение	Особенности использования
Средства для этапов полёта			
Изделие «Браслет»	Пояс из эластичных материалов, который накладывается на проксимальную область бёдер.	Препятствует перераспределению жидкости в краниальном направлении.	На начальных этапах полёта.
Пневмовакуумный костюм «Чибис» (ОДНТ)	Герметичный костюм-штаны, создающий отрицательное давление в нижней половине тела.	Способствует перераспределению жидкости, схожему с таковым в условиях гравитации. Подготовка к возвращению в условия земной гравитации (1g).	На заключительных этапах полёта.
Водно-солевые добавки	Используются в форме таблеток.	Способствуют задержке жидкости в организме и повышению объёма плазмы крови.	На заключительных этапах полёта перед посадкой.
Противоперегрузочный костюм «Кентавр»	Утягивающие шорты и гетры на шнуровке.	Профилактика нарушений кровообращения. Защита от перегрузок на этапе спуска. Повышение ортостатической устойчивости в послеполётный период реадaptации.	Во время спуска и при реадaptации к условиям 1g.

Физическая тренировка как основной метод профилактики негативных эффектов космического полёта

Физические упражнения на сегодняшний являются основным методом профилактики негативных влияний невесомости и занимают до 25% рабочего времени экипажей МКС [16, 17]. Разработка отечественной системы профилактики невесомости началась после первого длительного (18 суток) космического полёта А.Г. Николаева и В.И. Севастьянова. После 18-суточного космического полёта без применения средств профилактики были выявлены существенные изменения в состоянии сердечно-сосудистой и опорно-двигательной систем. В течение трёх часов после приземления космонавтам было трудно сохранять вертикальную позу, незначительные нагрузки вызвали резкий рост частоты сердечных сокращений. В течение 3-4 суток после приземления Земная гравитация воспринималась

космонавтами как воздействие перегрузок 2-2,5 g. Ортостатическая устойчивость была снижена, и на 10-е сутки после приземления только начала приближаться к дополётным значениям [18]. После этого полёта началось создание системы профилактики негативных эффектов невесомости, за разработку которой коллектив авторов из Института космической биологии и медицины (сейчас – ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН) (П.В. Васильев, А.М. Генин, И.Д. Пестов, В.И. Степанцов и др. под руководством академика О.Г. Газенко) в 1987 году удостоился государственной премии [19]. Современная российская система профилактики негативных эффектов невесомости основывается на разработках советских исследователей, но постоянно совершенствуется на основе индивидуальных особенностей космонавтов [20, 21] с учётом «слабого звена» в физиологических механизмах обеспечения интенсивной двигательной активности [22].

Согласно современным представлениям, опирающимся на работы российских ученых, основным тренирующим эффектом в невесомости является воспроизведение в ходе полёта весовой нагрузки, характерной для условий Земли. Такую нагрузку в невесомости создают естественные локомоции – ходьба и бег, выполнение которых обеспечивает афферентный поток импульсов, способствующий сохранению способности выполнять ходьбу и бег после возвращения в условия гравитации. Подчёркивается важная роль быстрого бега, так как во время его выполнения достигается величина опорных реакций, характерная для локомоций в условиях Земли [23]. Исследования показывают важность также режима перемещения полотна дорожки в невесомости – с помощью мотора («активный» бег) или посредством силы ног космонавта (в механическом режиме, или «пассивный» бег). Показана эффективность «пассивного» режима движения полотна, но существуют и данные о том, что эффективность того или иного режима тренировки индивидуальна [24, 25]. Тренировки на «бегущей дорожке» также оказывают комплексное профилактическое влияние на кардиореспираторную и мышечную системы, сохраняя аэробную и анаэробную работоспособность и свойства позно-тонической мускулатуры, в частности – m. soleus [25]. Бег в невесомости способствует физиологичному перераспределению крови и сохранению ортостатической устойчивости [16].

Силовые тренировки в невесомости являются эффективным средством для сохранения костной и мышечной ткани. И российскими, и зарубежными специалистами показано уменьшение потерь минеральной плотности кости при выполнении силовых нагрузок космонавтами в ходе полёта, однако отмечается значительная индивидуальная вариативность [26, 26]. В российской системе профилактики при выполнении упражнений рекомендуется использование весового нагружения, близкого к весу человека до полёта. Российские специалисты не рекомендуют использование больших нагружений в силовых тренировках в невесомости из-за риска развития SANS – нейроокулярного синдрома [16]. Американские астронавты используют силовые тренировки с более интенсивным нагружением. В настоящее время продолжается эксперимент NASA по полной замене тренировок на «бегущей дорожке» силовыми тренировками и велотренировками [28].

Средства профилактики негативных эффектов невесомости, применяемые российскими космонавтами

Для профилактики негативных симптомов со стороны сердечно-сосудистой, нервно-мышечной, костной систем и перестроек метаболизма в длительном космическом полёте обязательным является систематическое выполнение физических упражнений. В насто-

ящее время в российской системе профилактики негативных эффектов невесомости на российском сегменте МКС используются следующие тренировочные средства: «бегущая дорожка» БД-2 (рис. 1), бортовой велотренажёр ВБ-3М с нагрузателем силовым, эспандеры, ОДНТ-костюм «Чибис», противоперегрузочный костюм «Кентавр», окклюзионные манжеты, также используется тренажёр ARED (рис. 2), расположенный на американском сегменте станции [12].



Рис. 1: Космонавт Олег Артемьев тренируется на «бегущей дорожке» БД-2 [29]

Fig. 1: Cosmonaut Oleg Artemyev trains on the BD-2 treadmill BD-2

В российской системе профилактики особое внимание уделяется тренировкам на «бегущей дорожке» БД-2 как движениям, наиболее близким по биомеханике к естественным локомоциям человека, способность к выполнению которых необходимо сохранить в ходе космической миссии. Выбор «бегущей дорожки» в качестве основного средства профилактики обусловлен тем, что именно способность к ходьбе, бегу, поддержанию вертикального положения тела будет востребована при выполнении напланетной деятельности при освоении

дальнего космоса. Тренировки на «бегущей дорожке» вовлекают в работу физиологические системы, которые являются наиболее чувствительными к негативным влияниям невесомости, обеспечивают приток сенсорных сигналов от рецепторов опоры, профилируют изменения в костной системе, противодействуют негативным изменениям в кислородтранспортной системе. «Бегущая дорожка» БД-2 позволяет выполнять бег как в «активном» режиме движения полотна, с включением мотора дорожки, так и в «пассивном» режиме, который предполагает перемещение полотна дорожки силой ног космонавта. Занятия на БД-2 выполняются с применением переменного метода тренировки и предполагают выполнение трёх стандартных тренировочных протоколов. В каждой тренировке выполняется бег как в «активном», так и в «пассивном» режиме движения полотна БД-2, рекомендуемая доля бега в «пассивном» режиме составляет 30%. Изменение скорости бега в «пассивном» режиме движения полотна позволяет варьировать интенсивность нагрузки. Тренировки с использованием «бегущей дорожки» проводятся по четырёхдневному микроциклу и выполняются с первого по третий день. В первые три дня микроцикла используются стандартные протоколы, описанные в бортовой документации. В заключительный, четвёртый день микроцикла космонавт тренируется по индивидуальному протоколу.



Рис. 2: Космонавт Олег Кононенко тренируется на силовом тренажёре ARED [30]

Fig. 2: Cosmonaut Oleg Kononenko trains on the ARED strength simulator

Тренировки на велоэргометре ВБ-3М и силовом тренажёре ARED выполняются в качестве второй тренировки, средства чередуют по очереди через день [16].

Протоколы нагрузки на тренажёре ARED составляются для каждого космонавта с учётом его индивидуальных особенностей и корректируются в ходе полёта. Обычно специалистами составляются 2 или 3 универсальных по составу упражнений протокола тренировок, которые можно комбинировать с любой нагрузкой на «бегущей дорожке». Типовая трени-

ровка представляет собой комплекс из 5-7 упражнений, каждая тренировка в обязательном порядке содержит упражнения для мышц ног и спины. Особое внимание уделяется упражнению «подъём на носки», так как при его выполнении задействована *m. soleus* – мышца, ответственная за поддержание вертикальной позы и особенно сильно подверженная негативным изменениям в невесомости [31]. Силовые тренировки направлены в основном на поддержание силовой выносливости, рекомендованное число повторений составляет 16-20 раз в 3 подхода. Тренировки на ВБ-3М выполняются по трём стандартным протоколам бортовой документации с применением переменного метода тренировки.

Во время тренировки на БД-2 регистрируются следующие показатели: режим и скорость локомоций, величина «притяга» - нагрузки по вертикальной оси тела, ЧСС, величины опорных реакций во время бега. Величины опорных реакций регистрируются тензодатчиками БД-2 и позволяют выполнять биомеханический анализ ходьбы и бега. Ответ ЧСС регистрируется нагрудным пульсометром в пульт управления БД-2. Во время тренировки на ARED регистрируется количество подходов, повторений, величина нагрузки. Велоэргометр ВБ-3М позволяет регистрировать мощность нагрузки, частоту педалирования и реакцию ЧСС. Регистрируемые показатели еженедельно передаются специалистам на Землю для анализа и составления заключения и рекомендаций на следующую неделю. Анализ данных осуществляют специалисты Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем РАН.



Рис. 3: Астронавт JAXA (Японского космического агентства) Сатоши Фурукава тренируется на велоэргометре системы CEVIS [32]

Fig. 3: JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) astronaut Satoshi Furukawa pedals on the CEVIS system

Средства и методы профилактики негативных эффектов невесомости иностранных партнёров по МКС

Партнёры по МКС в системе профилактики негативных проявлений длительного пребывания в невесомости используют велоэргометр CEVIS (рис. 3), «бегущую дорожку» T2 (COLBERT) (рис. 4) для выполнения кардиотренировок, силовой тренажёр ARED. Тренировочный подход, используемый для астронавтов, включает три этапа: первый – этап адаптации (ознакомление экипажа с тренировочным оборудованием и привыкание к тренировкам в невесомости, 1-20 дни КП), второй – основной этап (противодействие адаптации физиологических систем к условиям невесомости, 130-150 дней), третий – этап подготовки к спуску (подготовка к возвращению в условия гравитации и возможным нештатным вариантам спуска, заключительные 15-30 дней миссии). Интенсивность первого этапа относительно низкая – 50-60% от дополётного уровня, впоследствии увеличивается. На этапе подготовки к спуску, в течение 3-4 заключительных недель на станции, экипаж увеличивает объём силовых тренировок и тренировок на «бегущей дорожке», велоэргометр исключается из тренировочных средств [33, 34].



Рис. 4: Астронавт ESA (Европейского космического агентства) Саманта Кристофоретти бежит на «бегущей дорожке» T2 [32]

Fig. 4: ESA (European Space Agency) Astronaut Samantha Cristoforetti runs on the T2 treadmill

Специалистами NASA выполнен эксперимент, оценивающий эффективность систем профилактики включающий силовые упражнения, интервальные тренировки на «бегущей дорожке» и равномерные тренировки на велоэргометре [35]. Тренировки выполнялись по 7-

дневному микроциклу с отдыхом на 7-й день. В 1-й, 3-й и 5-й дни микроцикла выполнялась силовая тренировка и равномерная тренировка на велоэргометре; во 2-й, 4-й и 6-й дни выполнялась интервальная тренировка на «бегущей дорожке». Интенсивность равномерной тренировки составляла 75-80% $\text{VO}_2 \text{ max}$, продолжительность - 30 мин. Интенсивность интервалов на «бегущей дорожке» составляла 70-100% $\text{VO}_2 \text{ max}$, включая выполнение максимального усилия ($> \text{VO}_2 \text{ max}$), длительность - 0,5-4 мин, от 4 до 8 повторений, продолжительность тренировок - 15-35 мин. Величина аксиального нагружения во время бега составляла 75-80% от массы тела [36].

Выводы

Переход от орбитальных полётов к освоению дальнего космоса и автономным полётам намечает направления совершенствования систем профилактики негативных эффектов невесомости. Описанные средства и методы позволяют успешно бороться с негативными эффектами влияния невесомости на организм человека в условиях орбитальных полётов. Учёным ещё только предстоит создание «интеллектуального телемедицинского контура» - автоматической системы поддержки принятия решений с использованием искусственного интеллекта, которая будет способна заменить специалиста по профилактике в автономном полёте. В настоящее время российскими специалистами ведутся работы по поиску математических моделей для прогнозирования физической работоспособности в условиях космического полёта [37], изучаются методы индивидуализации тренировочного процесса [38]. На данный момент физические тренировки являются основным средством профилактики негативных эффектов пребывания в невесомости. Подходы к профилактике негативных эффектов невесомости в российской и международной системах профилактики имеют некоторые различия. В российской системе профилактики больше внимания уделяется сохранению естественных локомоций и аэробной выносливости на «бегущей дорожке», тогда как партнёры по МКС в основном используют силовой тренажёр, обращая особое внимание на противодействие потерям минеральной плотности скелета. Тем не менее, набор средств профилактики в целом схож у всех участников программы МКС.

Заключение

Подготовка к межпланетным полётам ставит задачу продолжения работ по оптимизации системы профилактики негативных влияний невесомости, разработки новых средств и методов с использованием современных информационных технологий и искусственного интеллекта, позволяющих планировать и выполнять тренировочные программы в автономном режиме.

Список литературы/References

1. Григорьев А.И., Орлов О.И., Баранов В.М. Космическая медицина. Научные основы, достижения и вызовы // Вестник Российской академии наук. 2021. Т.91. №11. С.1036–1040. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587321110050> EDN: <https://elibrary.ru/vhzffv>

Grigoriev A.I., Orlov O.I., Baranov V.M. Space medicine: scientific foundations, achievements and challenges. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2021, 91(11), pp. 1036–1040. (in Russ.)

2. Котовская А.Р., Колотева М.И. Проявление детренированности сердечно-сосудистой системы человека на этапе возвращения на Землю после пребывания в невесомости // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т.50. №1. С.13–16. EDN: <https://elibrary.ru/vpayln>
- Kotovskaya A.R., Koloteva M.I. Manifestation of cardiovascular system detraining during the return to Earth after weightlessness. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2016, 50(1), pp. 13–16. (in Russ.)
3. Iwase S., Tanaka K., Sugeno J., Takada H., Miwa N., Nishimura N., Mukai C. Effects of microgravity on human physiology. *Beyond LEO-Human Health Issues for Deep Space Exploration*, IntechOpen, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.90700>
4. Marshall-Goebel K., Laurie S.S., Alferova I.V., Arbeille P., Auñón-Chancellor S.M., Ebert D.J., Stenger M.B. Assessment of jugular venous blood flow stasis and thrombosis during spaceflight. *JAMA Network Open*, 2019, 2(11), pp. e1915011. DOI: <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.15011>
5. Vernice N.A., Meydan C., Afshinnekoo E., Mason C.E. Long-term spaceflight and the cardiovascular system. *Precision Clinical Medicine*, 2020, 3(4) pp. 284–291. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcmedi/pbaa022>
6. Norsk P. Adaptation of the cardiovascular system to weightlessness: surprises, paradoxes and implications for deep space missions. *Acta Physiologica*, 2020, 228(3), pp. e13434. DOI: <https://doi.org/10.1111/apha.13434>
7. Aubert A.E., Larina I., Momken I., Blanc S., White O., Kim Prisk G., Linnarsson D. Towards human exploration of space: the THESEUS review series on cardiovascular, respiratory, and renal research priorities. *npj Microgravity*, 2016, 2(1), pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1038/npjmgrav.2016.31>
8. Norsk P., Asmar A., Damgaard M., Christensen N.J. Fluid shifts, vasodilatation and ambulatory blood pressure reduction during long duration spaceflight. *The Journal of Physiology*, 2015, 593(3), pp. 573–584. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2014.284869>
9. Moore A.D., Downs M.E., Lee S.M., Feiveson A.H., Knudsen P., Ploutz-Snyder L. Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight. *Journal of Applied Physiology*, 2014, 117(3), pp. 231–238. DOI: <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01251.2013>
10. Juhl O.J., Buettmann E.G., Friedman M.A., DeNapoli R.C., Hoppock G.A., Donahue H.J. Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system. *npj Microgravity*, 2021, 7(1), pp. 28. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41526-021-00158-4>
11. Smith S.M., Heer M.A., Shackelford L.C., Sibonga J.D., Ploutz-Snyder L., Zwart S.R. Benefits for bone from resistance exercise and nutrition in long-duration spaceflight: evidence from biochemistry and densitometry. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2012, 27(9), pp. 1896–1906. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbmr.1647>
12. Kozlovskaya I.B., Yarmanova E.N., Yegorov A.D., Stepantsov V.I., Fomina E.V., Tomilovskaya E.S. Russian countermeasure systems for adverse effects of microgravity on long-duration ISS flights. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 2015, 86(12), pp. A24–A31. DOI: <https://doi.org/10.3357/AMHP.EC04.2015> EDN: <https://elibrary.ru/xmxevx>
13. Kukoba T.B., Novikov V.E., Babich D.R., Lysova N.Y., Gordienko K.V., Fomina E.V. Preventive Efficiency of Resistive Exercises for the Bone System of Cosmonauts in Repeated Long-Duration Space Missions. *Human Physiology*, 2019, 45, pp. 759–763. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0362119719070107>
14. Koschate J., Drescher U., Werner A., Thieschäfer L., Hoffmann U. Cardiovascular regulation: associations between exercise and head-up tilt. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 2019, 97(8), pp. 738–745. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjpp-2018-0742>
15. Lackner J.R., DiZio P. Space motion sickness. *Experimental Brain Research*, 2006, 175, pp. 377–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0697-y>

16. Фомина Е.В., Сенаторова Н.А., Кириченко В.В., Вагнер И.В. МКС-платформа для разработки системы профилактики гипогравитационных нарушений в межпланетных миссиях // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 4 (105). С. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2020-105-4-8-17> EDN: <https://elibrary.ru/ijxqdg>

Fomina E.V., Senatorova N.A., Kirichenko V.V., Wagner I.V. ISS as a platform for developing a system to prevent hypogravity disorders in interplanetary missions. *Aerospace Sphere*, 2020, (4)105 pp. 8–17. (in Russ.)

17. Scott J.P.R., Weber T., Green D.A. Optimization of exercise countermeasures for human space flight—lessons from terrestrial physiology and operational implementation. *Frontiers in Physiology*, 2020, 10, pp. 1567. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01567>

18. Котовская А.Р., Колотева М.И. Проявление детренированности сердечно-сосудистой системы человека на этапе возвращения на Землю после пребывания в невесомости // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 1. С. 13–16. EDN: <https://elibrary.ru/vpayln>

Kotovskaya A.R., Koloteva M.I. Detraining of the cardiovascular system upon return to Earth after exposure to weightlessness. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2016, 50(1), pp. 13–16. (in Russ.)

19. Жданько И.М., Бедненко В.С., Хоменко М.Н., Ворона А.А., Филатов В.Н. Вклад ГНИИИ авиационной и космической медицины Министерства обороны в медико-биологическое обеспечение полёта в космос Ю.А. Гагарина // Авиационно-космическая медицина, авиационная психология и военная эргономика. 2021. С.93–100. EDN: <https://elibrary.ru/silgin>

Zhdanko I.M., Bednenko V.S., Khomenko M.N., Vorona A.A., Filatov V.N. Contribution of the State Research Institute of Aviation and Space Medicine of the Ministry of Defense to the medical and biological support of Yu.A. Gagarin's space flight. *Aerospace Medicine, Aviation Psychology and Military Ergonomics*, 2021, pp. 93–100. (in Russ.)

20. Козловская И.Б., Егоров А.Д., Сонькин В.Д. Векторные подходы к системе профилактики для марсианской экспедиции // Физиология человека. 2010. Т.36. №3. С.12–18. EDN: <https://elibrary.ru/msqrwt>

Kozlovskaya I.B., Yegorov A.D., Sonkin V.D. Vector approaches to the prevention system for a Martian expedition. *Human Physiology*, 2010, 36(3), pp. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0362119710030023> EDN: <https://www.elibrary.ru/mxnmwh>

21. Scott J.M., Feiveson A.H., English K.L., Spector E.R., Sibonga J.D., Dillon E.L., Everett M.E. Effects of exercise countermeasures on multisystem function in long duration spaceflight astronauts. *npj Microgravity*, 2023, 9(1), pp. 11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00256-5>

22. Фомина Е.В., Лысова Н.Ю., Резванова С.К., Киреев К.С., Котов О.В., Новицкий О.В., Тимме Е.А. Предикторы готовности космонавта к деятельности на поверхности Марса из опыта орбитальных полетов на МКС // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 7. С.19–27. DOI: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2019-53-7-19-27> EDN: <https://elibrary.ru/ropmom>

Fomina E.V., Lysova N.Y., Rezvanova S.K., Kireev K.S., Kotov O.V., Novitsky O.V., Timme E.A. Predictors of cosmonaut readiness for activities on the Martian surface based on orbital flight experience on the ISS. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2019, 53(7), pp. 19–27. (in Russ.)

23. Фомина Е.В., Сенаторова Н.А., Бахтерева В.Д., Ярманова Е.Н., Козловская И.Б. Роль быстрого бега в предотвращении негативных влияний пребывания человека в невесомости // Медицина экстремальных ситуаций. 2023. Т. 25. № 4. С.98–105. DOI: <https://doi.org/10.47183/mes.2023.046>

Fomina E.V., Senatorova N.A., Bakhtereva V.D., Yarmanova E.N., Kozlovskaya I.B. The role of fast running in preventing the negative effects of human stay in weightlessness. *Medicine of Extreme Situations*, 2023, 25(4), pp. 98–105. (in Russ.)

24. Фомина Е.В., Лысова Н.Ю., Чернова М.В., Хустнудинова Д.Р., Козловская И.Б. Сравнительный анализ профилактической эффективности различных режимов локомоторных тренировок в условиях космического полета // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 5. С.84–91. DOI:

<https://doi.org/10.7868/S0131164616050076> EDN: <https://elibrary.ru/wlnkdp>

Fomina E.V., Lysova N.Y., Chernova M.V., Khusnutdinova D.R., Kozlovskaya I.B. Comparative analysis of the preventive effectiveness of different modes of locomotor training during spaceflight. *Human Physiology*, 2016, 42(5), pp. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0362119716050078> EDN: <https://www.elibrary.ru/xfplaz>

25. Фомина Е.В., Савинкина А.О., Лысова Н.Ю. Эффективность локомоторных тренировок на борту Международной космической станции в зависимости от индивидуальных особенностей величин опорных реакций // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51. № 7. С.48–52. EDN: <https://elibrary.ru/ymmpu>

Fomina E.V., Savinkina A.O., Lysova N.Y. Effectiveness of locomotor training aboard the International Space Station depending on individual characteristics of support reaction values. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2017, 51(7), pp. 48–52. (in Russ.)

26. Comfort P., McMahon J.J., Jones P.A., Cuthbert M., Kendall K., Lake J.P., Haff G.G. Effects of spaceflight on musculoskeletal health: a systematic review and meta-analysis, considerations for interplanetary travel. *Sports Medicine*, 2021, 51, pp. 2097–2114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01496-9>

27. Кукоба Т.Б., Новиков В.Е., Бабич Д.Р., Лысова Н.Ю., Гордиенко К.В., Фомина Е.В. Профилактическая эффективность резистивных упражнений для костной системы космонавтов в многократных длительных космических полетах // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52, № 5. С. 28–33. DOI: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2018-52-5-28-33> EDN: <https://www.elibrary.ru/ykjav>

Kukoba T.B., Novikov V.E., Babich D.R., Lysova N.Yu., Gordienko K.V., Fomina E.V. Preventive effectiveness of resistive exercises for the bone system of astronauts in multiple long-term space flights. *Aerospace and environmental medicine*, 2018, 52(5), pp. 28–33. (in Russ.)

28. Varanoske A.N., Prejean B.J., Strock N.C., Conly D., Peters B.T., Morant E.S., Marshall-Goebel K. Effects of Replacing Treadmill Running with Alternative Exercise Countermeasures During Long-Duration Spaceflight on Astronaut Health and Performance. *Human Research Program Investigators' Workshop (HRP IWS)*, 2025. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20240000929>

29. Личный сайт космонавта Олега Артемьева. [Электронный ресурс]. URL: <https://artemjew.ru/en/2014/09/20/sport/> (Дата обращения: 10.07.2025)

Personal website of cosmonaut Oleg Artemyev. [Electronic resource]. (in Russ.) (Accessed: 10.07.2025)

30. Орбитальная галерея космонавта Олега Кононенко. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/25915/> (Дата обращения: 10.07.2025)

The Orbital Gallery of cosmonaut Oleg Kononenko. [Electronic resource]. (in Russ.) (Accessed: 10.07.2025)

31. Moosavi D., Wolovsky D., Depompeis A., Uher D., Lennington D., Bodden R., Garber C.E. The effects of spaceflight microgravity on the musculoskeletal system of humans and animals, with an emphasis on exercise as a countermeasure: A systematic scoping review. *Physiological Research*, 2021, 70(2), pp. 119. DOI: <https://doi.org/10.33549/physiolres.934550>

32. *Astronaut Exercise*. [Electronic resource]. URL: <https://www.nasa.gov/general/astronaut-exercise/> (Accessed: 10.07.2025)

33. Loerch L.H. Exercise countermeasures on ISS: summary and future directions. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 2015, 86(12) pp. A92–A94. DOI: <https://doi.org/10.3357/AMHP.EC12.2015>

34. Petersen N., Jaekel P., Rosenberger A., Weber T., Scott J., Castrucci F., Mester J. 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), pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13728-016-0050-4>

35. Ploutz-Snyder L.L., Downs M., Goetchius E., Crowell B., English K.L., Ploutz-Snyder R., Scott J.M. Exercise training mitigates multisystem deconditioning during bed rest. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2018, 50(9) pp. 1920. DOI: <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001558>
36. Trappe T.A., Minchev K., Perkins R.K., Lavin K.M., Jemiolo B., Ratchford S.M., Trappe S.W. NASA SPRINT exercise program efficacy for vastus lateralis and soleus skeletal muscle health during 70 days of simulated microgravity. *Journal of Applied Physiology*, 2024, 136(5), pp. 1015–1039. DOI: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00489.2023>
37. Фомина Е.В., Ганичева А.А., Кокуева М.А., Устюгов В.Н. Прогнозирование физической работоспособности космонавтов - первые эксперименты по выбору математической модели // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2023. Т. 57, № 6. С. 11-17. DOI: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2023-57-6-11-17> EDN: <https://elibrary.ru/tuigvb>
- Fomina E.V., Ganicheva A.A., Kokueva M.A., Ustyugov V.N. Forecasting the physical performance of astronauts - the first experiments on choosing a mathematical model. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2023, 57(6), pp. 11-17. (in Russ)
38. Фомина Е.В., Лысова Н.Ю. Регрессионная модель как основа индивидуального подхода к построению системы профилактики неблагоприятного влияния невесомости // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52, № 2. С. 16-23. DOI: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2018-52-2-16-23> EDN: <https://www.elibrary.ru/laopwh>
- Fomina E.V., Lysova N.Yu. Regression model as the basis of an individual approach to building a prevention system for the adverse effects of weightlessness. *Aerospace and environmental medicine*, 2018, 52(2), pp. 16-23. (in Russ.)

Финансирование

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ - ИМБП РАН (№ FMFR-2024-0037).

Сведения об авторах

Кокуева Мария Андреевна – лаборатория профилактики гипогравитационных нарушений ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва, Россия. E-mail: kokueva.m@yandex.ru

Фомина Елена Валентиновна – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, лаборатория профилактики гипогравитационных нарушений ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва, Россия. E-mail: fomin-fomin@yandex.ru

Для цитирования:

Кокуева М.А., Фомина Е.В. Программно-технические средства профилактики негативных эффектов невесомости, воздействующей на космонавтов в условиях орбитальных полетов // Российский журнал информационных технологий в спорте. – 2025. – Т. 2, № 2. – С. 42–60. DOI: <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2025-2-2-42-60> EDN: [KKJBQ](https://elibrary.ru/kkjbq)

For citation:

Kokueva M.F., Fomina E.V. Software and hardware tools for preventing the negative effects of weightlessness affecting astronauts during orbital flights system. *Russian Journal of Information*

Technology in Sports, 2025, 2 (2), pp. 42–60 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.62105/2949-6349-2025-2-2-42-60> EDN: KKJEBQ

Статъа поступила в редакцию: 03.07.2025

Статъа принята в печать: 15.07.2025

Статъа опубликована: 23.07.2025