

УДК 612.812

## РОЛЬ СТИМУЛЯЦИИ РЕЦЕПТОРОВ ОПОРЫ В ЛОКОМОТОРНЫХ ТРЕНИРОВКАХ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ ГИПОГРАВИТАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ

© 2021 г. Е. В. Фомина<sup>1,2, \*</sup>, Н. Ю. Лысова<sup>1</sup>, А. О. Савинкина<sup>1</sup>,  
Р. Ю. Жедяев<sup>1, \*\*</sup>, Н. А. Сенаторова<sup>1</sup>, Т. Б. Кукоба<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

\*E-mail: fomin-fomin@yandex.ru

\*\*E-mail: zhedyayev-r@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 09.02.2021 г.

Анализ времени стимуляции рецепторов опоры в локомоторной тренировке выполнен индивидуально для 13 космонавтов за каждые сутки длительного космического полета (КП). Время стимуляции рецепторов опоры с интенсивностью, сопоставимой с таковой в условиях 1G, оказалось достаточно мало в сопоставлении с условиями Земли. Обнаружена отрицательная корреляционная взаимосвязь между временем стимуляции рецепторов опоры в локомоторных тренировках и величиной изменений электромиографического ответа камбаловидной мышцы на выполнение ходьбы после полета. Время стимуляции рецепторов опоры, можно рассматривать, как и величину нагружения по вертикальной оси тела и долю пассивного режима движения полотна дорожки, в качестве значимого показателя для персонализированного подхода в организации профилактики гипогравитационных нарушений во время длительных КП.

**Ключевые слова:** гравитационная физиология, опорная афферентация, система профилактики, локомоторная тренировка, длительный космический полет, электромиографическая стоимость.

**DOI:** 10.31857/S013116462103005X

Гравитационная физиология как наука начала развиваться во время подготовки и реализации первых космических полетов (КП). Облик системы профилактики гипогравитационных нарушений в длительных КП основан на принципах, проверенных в наземных модельных экспериментах с первых лет освоения человеком космического пространства, и к настоящему времени сформирован во многом благодаря Инесе Бенедиктовне Козловской на основе понимания механизмов развития гипогравитационного двигательного синдрома. Негативные изменения в двигательной и сердечно-сосудистой системах прослеживались уже в полетах до пяти суток, но особо остро проблема профилактики гипогравитационных нарушений встала после 17-суточного автономного полета “Союз-9” в 1970 г. [1]. На современном этапе развития космической медицины, когда возникает вопрос о средствах профилактики в кораблях, разрабатываемых для Лунных экспедиций, необходимо помнить о важных уроках полета Виталия Севастьянова и Андрияна Николаева.

Серьезная отработка системы профилактики для длительных полетов была проведена под руководством А.И. Григорьева и И.Б. Козловской в наземных модельных экспериментах, где рекордным явился эксперимент с антиортостатической гипокинезией длительностью 370 дней [2]. Результаты экспериментов в условиях “сухой” иммерсии (СИ) позволили сформулировать концепцию о ведущей роли снижения интенсивности афферентного притока от опорного входа в условиях невесомости в развитии гипогравитационного двигательного синдрома. В условиях безопорности уменьшение интенсивности стимуляции рецепторов опоры приводит к снижению активности медленных спинальных мотонейронов, и, как следствие, к угнетению тонической активности медленных мышечных волокон, а в дальнейшем – к изменению “протеостаза”; механизмы этого явления на уровне сигнальных путей продолжают изучаться [3–5]. Снижение тонуса и силы мышц, наряду с изменениями афферентного синтеза, в свою очередь, ведут к перестройкам в системе моторного контроля, ухудшению регу-

ляции вертикальной позы и нарушению локомоций [6, 7]. Исследования, проведенные в коротких и длительных КП, согласуются с результатами модельных экспериментов, указывая на структурные и функциональные перестройки в мышцах, где одной из самых подверженных гравизависимым изменениям является камбаловидная мышца [8], что обусловлено ее участием в поддержании позы и широкой представленностью медленных мышечных волокон, наиболее страдающих в условиях КП, когда исчезает необходимость поддержания позы в гравитационном поле Земли. Коррекция гипогравитационных изменений в нервно-мышечной системе при использовании компенсатора опорной разгрузки в модельных экспериментах в условиях СИ [9–11] и в модельных экспериментах с антиортостатическим вывешиванием задних конечностей животных [5] подтвердила справедливость концепции ведущей роли опорной афферентации в организации позно-тонической активности.

Представления о механизмах развития гипогравитационного двигательного синдрома, характеризующегося атонией, атрофией, снижением выносливости и силовых способностей мышц, легли в основу формирования российской системы профилактики гипогравитационных нарушений, ключевым элементом которой являются тренировки на беговой дорожке. Исследования, проведенные в длительных КП на МКС, позволили выделить основные факторы локомоторных тренировок, определяющие эффективность профилактики гипогравитационных нарушений [12, 13].

Предположение о том, что время и интенсивность сенсорного притока от опорного входа влияют на степень послеполетных изменений в камбаловидной мышце, как наиболее чувствительной к отсутствию опорных сигналов, послужило гипотезой нашего исследования. В соответствии с гипотезой была выбрана цель настоящего исследования – оценка вклада стимуляции рецепторов опоры во время выполнения локомоторных тренировок в длительном КП в изменения электромиографической (ЭМГ) стоимости ходьбы после полета.

## МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 13 космонавтов, совершивших экспедиции на МКС продолжительностью  $165 \pm 25$  сут (возраст  $47 \pm 5$  лет, вес  $81 \pm 8$  кг).

*Регистрация опорных реакций.* Оценку интенсивности стимуляции опорного входа выполняли на основе регистрации величины вертикальных составляющих опорных реакций с помощью тензодатчиков давления, расположенных под полотном беговой дорожки БД-2 (ГНЦ РФ-ИМБП,

РАН, г. Москва), с частотой опроса 100–120 Гц, по техническим причинам регистрируется только вертикальная составляющая. В качестве показателя максимального значения величины вертикальной составляющей опорных реакций были рассчитаны значения среднего арифметического двадцати максимумов опорных реакций за каждую локомоторную тренировку. Первичную обработку данных выполняли с использованием специально разработанного программного обеспечения. Был определен общий объем вертикальных составляющих опорных реакций за сутки в диапазонах, выделенных в зависимости от интенсивности воздействия опоры относительно веса тела человека на Земле: от 0 до 32%, от 32 до 64%, от 64 до 100% и больше.

*Электромиография.* ЭМГ-характеристики локомоций изучали при выполнении ходьбы по мягкой опоре в заданном метрономом темпе 90 шагов в минуту до и после полета. Оценивали максимальную амплитуду сглаженной инвертированной ЭМГ камбаловидной мышцы и рассчитывали изменение максимальной амплитуды после КП по сравнению с предполетными показателями. Проанализировали информацию о послеполетных изменениях ЭМГ 12 космонавтов, так как один из космонавтов не дал согласие на участие в наземной части эксперимента.

*Профилактика гипогравитационных нарушений во время космического полета.* Все космонавты выполняли профилактические мероприятия согласно бортовой документации. На этапе первоначальной адаптации, до 10-х сут миссии, космонавты выполняли физические тренировки с нагрузкой до 50% от рекомендованной, в связи с перестройками в основных системах организма, обеспечивающих работоспособность. Общая продолжительность физических тренировок с 11 сут КП составляла 2.5 ч в сутки, включая подготовительные операции и гигиенические процедуры. Космонавты выполняли тренировки дважды в день, при этом локомоторные тренировки на беговой дорожке БД-2 выполняли ежедневно, физические тренировки на велоэргометре ВБ-3М (Россия) и силовом тренажере *ARED (Advanced Resistive Exercise Device, США)* чередовали через день.

В зависимости от дня микроцикла основная часть тренировочного протокола включала в себя:

1-й день микроцикла – 4 интервала быстрого бега со скоростью 14 км/ч продолжительностью по 1 мин, между интервалами в течение 2 мин выполнялась ходьба.

2-й день микроцикла – чередование двух интервалов бега в пассивном режиме (передвижение полотна беговой дорожки усилием ног) со скоростью 8 км/ч и одного интервала в активном режиме (передвижение полотна дорожки посред-

ством мотора) со скоростью 12 км/ч, продолжительностью 2 мин, между интервалами выполнялась ходьба или интервалы отдыха продолжительностью 2 мин.

3-й день микроцикла — интервалы бега продолжительностью 4 мин со скоростью до 13 км/ч. Особенности протоколов для каждого дня микроцикла были определены разработчиками физических тренировок для системы профилактики гипогравитационных нарушений — В.И. Степанцовым и А.В. Ереминым [14, 15] и сохранялись в большой мере традиционны. Все протоколы осуществляются переменным методом с небольшими различиями в максимальной скорости бега, вклад силового компонента обусловлен долей пассивного режима движения полотна дорожки.

Во всех тренировочных протоколах вначале выполнялась разминка в виде бега в течение 4 мин со скоростью 7 км/ч, далее — нагрузочная часть в пассивном режиме работы полотна дорожки, включавшая чередование ходьбы в пассивном режиме движения полотна с двумя интервалами двухминутного бега со скоростью 6–8 км/ч.

В завершение всех тренировочных протоколов выполнялся отрезок ходьбы в течение 2 мин со скоростью 5 км/ч и бега в течение 2 мин со скоростью 8 км/ч в активном режиме работы полотна дорожки, и отрезок ходьбы в пассивном режиме продолжительностью 1 мин.

Четвертый день микроцикла — свободный. В нашей выборке в этот день микроцикла часть космонавтов выполняла тренировки по личному протоколу ( $n = 9$ ), а другая часть — предпочитала трехдневный микроцикл ( $n = 4$ ), т.е. вместо дня отдыха начинала следующий микроцикл. Анализировали параметры каждой тренировки в длительном полете, далее вычисляли средние за месяц миссии и за весь полет. Основные параметры тренировок на дорожке — величина осевой нагрузки, соотношение пассивного и активного режима работы полотна беговой дорожки, а также дистанция ежедневных локомоторных нагрузок — имели высокую вариативность. Рекомендованная величина осевой нагрузки составляет 70% от веса тела, и в основном космонавты следовали этой рекомендации. Однако наблюдали и исключения из этого правила, по медицинским показаниям величина осевой нагрузки могла снижаться, и нижний предел для нашей выборки составил 47% от веса тела на Земле, а один из космонавтов на заключительном этапе полета, по примеру партнеров по МКС, повышал эту величину до 92%. Рекомендованная доля пассивного режима движения полотна дорожки за тренировку различается по дням микроцикла, составляет в среднем 30% за 3 дня. В обследованной выборке этот параметр составил от 16 до 39% от общего локомоторного объема за день. Величина дистанции, прой-

денной за тренировку, также различалась по дням микроцикла и составляла в различные дни от 3000 до 6000 м. Ответ сердечно-сосудистой системы на локомоторную нагрузку учитывался на основе ежедневной регистрации частоты сердечных сокращений (*Polar*, Финляндия) во время тренировок, и достигала 180 уд./мин при выполнении интервалов бега. Высокая вариативность в величине осевой нагрузки по вертикальной оси тела, доле пассивного режима и дистанции тренировок обусловлена ограничением возможностей регламентирования тренировочного процесса в условиях реального КП.

Силовые тренировки с использованием тренажера *ARED* (США) космонавты выполняли через день. В процессе тренировки применяли два протокола, включавшие разные комплексы упражнений. Каждый протокол включал в себя упражнения для мышц ног (“Приседания” и “Подъемы на носки”). Величину “веса нагружения” в этих упражнениях подбирали каждому члену экипажа индивидуально. Космонавты использовали величину “веса нагружения” от 70 до 100% от веса тела на Земле и выполняли по 16–20 повторений в 3–4 подхода. В первые 10 сут КП использовали 50% от рекомендованной нагрузки. Далее каждые 3 нед. полета происходила коррекция параметров нагрузки в зависимости от уровня силовой подготовленности. Если космонавт справлялся с рекомендованной нагрузкой, то применяли волнообразный метод, т.е. 2–3 раза увеличивали величину “веса нагружения” (примерно на 10%), затем добавляли четвертый подход в упражнениях для мышц ног и спины. Затем рекомендовалось снизить величину “веса нагружения” до исходного уровня и на заключительном этапе полета увеличивали величину “веса нагружения” до максимальных значений, применявшихся в ходе полета.

*Статистическая обработка данных.* Статистическую обработку данных производили при помощи пакета программ *Statistica-10* и включали построение распределений, расчет индивидуальных средних значений и дисперсии показателей. Для проверки статистических гипотез о виде распределения был применен критерий *Shapiro-Wilk's W*. Во всех случаях распределение признаков не соответствовало закону нормального распределения, соответственно применяли непараметрические методы статистики. Взаимозависимость признаков была определена методом ранговой корреляции Спирмена. Статистически значимой считалась корреляция при  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среднее время стимуляции рецепторов опоры в локомоторных тренировках составило 25 мин 56 с за сутки, при этом время воздействия опоры с ин-

тенсивностью больше веса тела — 3 мин 15 с, в диапазоне от 64 до 100% от веса тела — 9 мин 26 с, в диапазоне от 32 до 64% от веса тела — 9 мин 11 с, в диапазоне от 0 до 32% от веса тела — 4 мин 4 с (табл. 1). Общая продолжительность стимуляции рецепторов опоры за время локомоторной тренировки составила в группе космонавтов от 20 до 30 мин в сутки, при этом большая часть объема стимуляции опорного входа соответствовала величинам опорных реакций, не превосходящим вес тела космонавта. Время воздействия с интенсивностью больше веса тела составило от одной до шести минут в сутки по всей обследованной группе космонавтов. Время воздействия с интенсивностью опорных реакций более 64% от веса тела составила от семи до шестнадцати с половиной минут в сутки по всей обследованной группе космонавтов.

В предпоследний месяц КП время стимуляции рецепторов опоры, в результате локомоторных тренировок, в среднем составило 28 мин 15 с, время воздействия опоры с интенсивностью больше веса тела — 4 мин 3 с, в диапазоне от 64 до 100% от веса тела — 10 мин 25 с, в диапазоне от 32 до 64% от веса тела — 9 мин 2 с, от 0 до 32% от веса тела — 4 мин 7 с.

В последний месяц КП общее время стимуляции рецепторов опоры в локомоторных тренировках в среднем составило 28 мин 13 с в сутки. Время воздействия опоры с интенсивностью больше веса тела в среднем за сутки составило 4 мин 20 с, в диапазоне от 64 до 100% от веса тела — 9 мин 34 с, в диапазоне от 32 до 64% от веса тела — 9 мин 11 с, в диапазоне от 0 до 32% от веса тела — 4 мин 11 с.

Анализ протоколов силовых тренировок, выполнявшихся космонавтами в ходе КП, показал, что в упражнениях “Приседания” интенсивность воздействия на рецепторы опоры составляла от 73.1 до 179.5% от веса тела космонавта на Земле, в упражнении “Подъемы на носки” — от 89.6 до 229.8% от веса тела. Величина нагружения в силовых тренировках относительно веса тела космонавта значительно не различалась в обследованной выборке.

После определения общего времени взаимодействия с опорой, во время локомоторной тренировки и времени взаимодействия во всех выделенных диапазонах интенсивности, был выполнен анализ ЭМГ камбаловидной мышцы до и после полета. Пример нативной и инвертированной записи ЭМГ камбаловидной мышцы приведен на рис. 1.

Статистический анализ позволил выявить обратную связь послеполетных изменений ЭМГ камбаловидной мышцы при выполнении ходьбы на 3 сут после полета с общим временем стимуля-

ции рецепторов опоры (коэффициент Спирмана  $\rho = -0.650$ ) (рис. 2).

Однако связи с интенсивностью стимуляции во всех изученных диапазонах и изменениями ЭМГ камбаловидной мышцы обнаружено не было (табл. 2).

Предположительно в ходе КП порог чувствительности рецепторов опоры может снижаться, в этой связи общее время воздействия опоры оказывается более значимым фактором в сохранении свойств камбаловидной мышцы, чем интенсивность стимуляции.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно концепции И.Б. Козловской, поток афферентных импульсов с рецепторов опоры обеспечивает организм информацией о величине гравитации, пребывание в условиях невесомости ведет первоначально к функциональным изменениям в мышечной системе, что проявляется в снижении тонуса, а позже — и к структурным перестройкам в мышцах [3, 4]. В большей степени отсутствие афферентного стимула оказывает влияние на тоническую мускулатуру, главным представителем которой является камбаловидная мышца, содержащая большое количество медленных мышечных волокон. Камбаловидная мышца отличается своей высокой активностью и наряду с другими постуральными мышцами (например, мышцами спины) обеспечивает статическую устойчивость в гравитационном поле Земли. Ее сократительная активность определяется двумя основными биомеханическими факторами: действующими на двигательную систему: осевой нагрузкой и силой реакции опоры. Оба фактора оказывают свое влияние в условиях земной гравитации и устраняются в условиях невесомости [5]. Этими особенностями камбаловидной мышцы и был обусловлен наш интерес к поиску взаимосвязи между послеполетными изменениями в ЭМГ при выполнении ходьбы и временем взаимодействия с опорой во время КП.

Интерес к изучению величины опорных реакций в условиях микрогравитации появился в конце прошлого столетия и сохраняется в настоящее время. Работы проводились в условиях, моделирующих эффекты невесомости, когда регистрировалась величина опорных реакций во время выполнения упражнений на вертикальной дорожке с вывеской [16, 17], а также в параболических полетах [18, 19]. В условиях МКС вертикальные составляющие опорных реакций регистрировались при выполнении бега на беговой дорожке в активном режиме движения полотна, а также во время тренировок на велоэргометре и силовом тренажере [17, 20]. В этих работах было показано, что во время физических тренировок в условиях

**Таблица 1.** Распределение индивидуальных значений среднесуточного времени стимуляции рецепторов опоры в локомоторной тренировке по диапазонам интенсивности стимуляции от веса тела космонавтов

Космонавт	Время стимуляции (с/сут)				
	общее время стимуляции	интенсивность > > веса тела	интенсивность 64—100% от веса тела	интенсивность 32—64% от веса тела	интенсивность 0—32% от веса тела
<i>A</i>	1684	148	724	622	190
<i>B</i>	1411	75	351	831	155
<i>C</i>	1518	282	398	630	208
<i>D</i>	1852	185	565	617	485
<i>E</i>	1690	141	849	450	251
<i>F</i>	1648	66	733	672	177
<i>G</i>	1530	139	584	564	243
<i>H</i>	1664	408	429	545	282
<i>I</i>	1337	164	409	516	248
<i>J</i>	1220	103	509	420	188
<i>K</i>	1595	289	675	298	333
<i>L</i>	1359	233	470	392	264
<i>P</i>	1717	305	666	604	142
<i>M ± σ</i>	1556 ± 181	195 ± 102	566 ± 154	551 ± 138	244 ± 90

Примечание: *M ± σ* — среднее значение ± дисперсия.

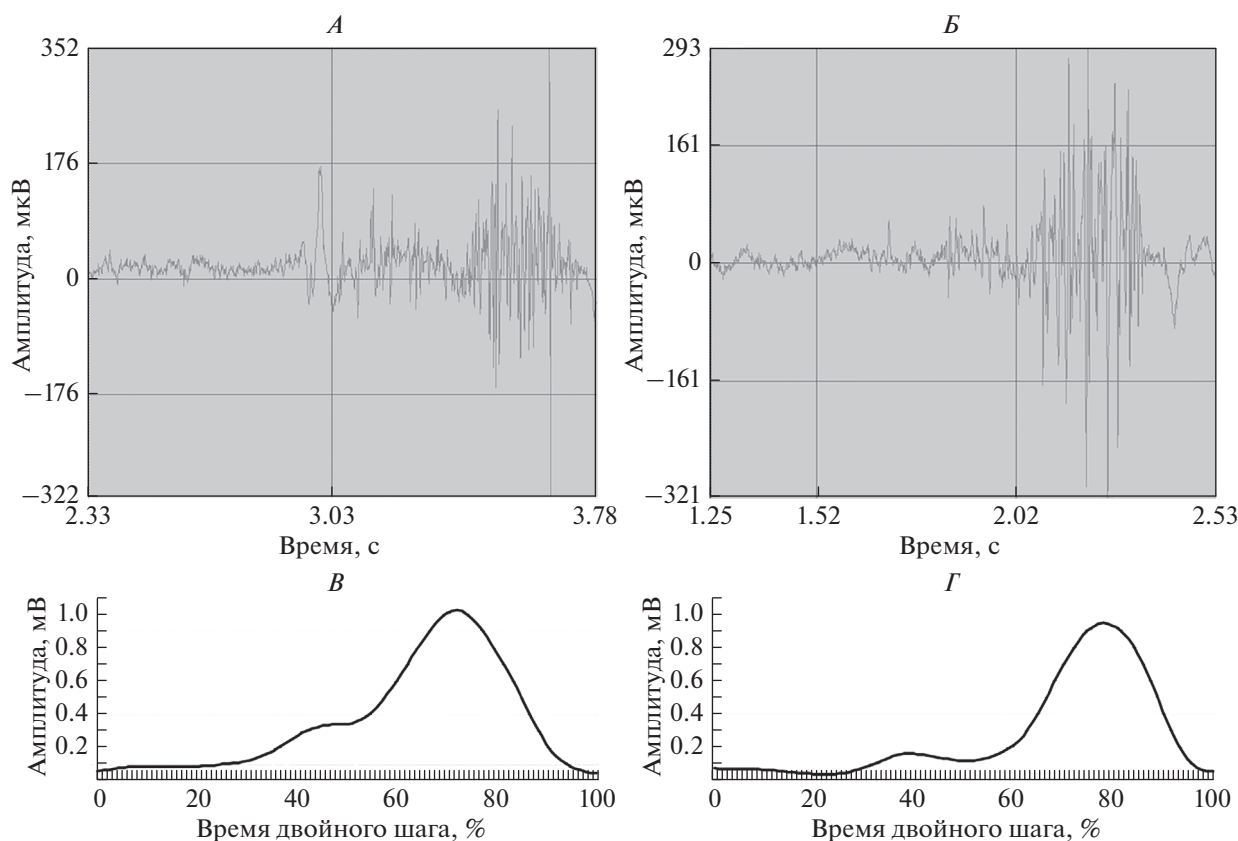


Рис. 1. Пример нативной (А, Б) и инвертированной (В, Г) записи электромиограммы камбаловидной мышцы до (А, В) и после (Б, Г) космического полета.

КП значения опорных реакций, близкие к наземным показателям, достигаются только во время локомоторных тренировок и во время силовых упражнений, выполняемых на одной ноге, таких как подъем на носок, приседание [21]. В условиях КП показана положительная взаимосвязь величины вертикальной составляющей максимальных опорных реакций со скоростью локомоций [19] и величиной аксиального нагружения [21]. Эти результаты уточнены в модельных исследованиях

с различным распределением одной и той же аксиальной нагрузки между сегментами тела, показавших, что величина опорных реакций меняется с изменением распределения нагрузки [22].

В настоящее время индивидуальные особенности опорных реакций рассматриваются в качестве одного из возможных показателей для персонализации тренировочного процесса [23]. Дальнейшая проверка справедливости концепции о триггерной роли информации об опоре в разви-

Таблица 2. Значения корреляционного анализа изменений электромиографического ответа на выполнение ходьбы с временем стимуляции в различных диапазонах интенсивности стимуляции

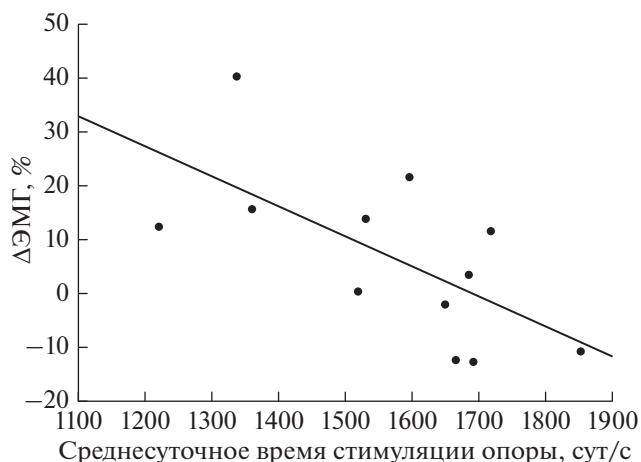
Параметр		Общее время стимуляции	Интенсивность > > веса тела	Интенсивность 64–100% от веса тела	Интенсивность 32–64% от веса тела	Интенсивность 0–32% от веса тела
ΔЭМГ	$\rho$	<b>-0.650</b>	0.021	-0.280	-0.469	-0.042
	$p$	<b>0.022</b>	0.948	0.379	0.124	0.897

Примечание: жирным выделены значения при  $p < 0.05$ .

тии гипогравитационного двигательного синдрома реализуется в настоящее время в космическом эксперименте “Профилактика-2”. Одной из задач эксперимента является определение эффективности использования компенсатора опорной разгрузки, обеспечивающего стимуляцию опорных зон стоп в режиме нормальных локомоций (60 и 120 шагов в минуту), с целью создания афферентного притока с рецепторов опоры [9]. По условиям эксперимента, в длительных экспедициях на МКС в течение 3–6 дней в начале и в середине полета исключаются тренировки на беговой дорожке БД-2 и заменяются на тренировки с компенсатором опорной разгрузки.

Можно предположить, что индивидуальные особенности опорных реакций человека при выполнении ходьбы и бега на дорожке могут явиться дополнительным информативным параметром для системы поддержки принятия решений в управлении тренировочным процессом в автономном полете. Ранее в качестве таких параметров предлагалось использовать ЭКГ, частоту дыхания, психофизиологические характеристики человека [24]. Не смотря на более чем полувековую историю поиска эффективных мер противодействия гипогравитационным нарушениям в организме человека, задачу сохранения физической работоспособности в длительных КП нельзя считать решенной [25]. Поиск эффективных методов и средств профилактики гипогравитационных нарушений продолжается и в настоящее время [26–30]. Физические упражнения остаются основным методом сохранения уровня физической работоспособности человека в длительном КП [31, 32], так как в условиях КП все физиологические системы, определяющие физическую работоспособность человека, подвергаются как структурным, так и функциональным перестройкам различной степени [3, 33–35].

В настоящем исследовании впервые выполнен анализ времени стимуляции рецепторов опоры в локомоторной тренировке индивидуально для каждого космонавта за каждые сутки длительного КП, показано, что это время стимуляции достаточно мало в сопоставлении с условиями Земли. Вклад локомоторных тренировок в стимуляцию рецепторов опоры с интенсивностью, сопоставимой с таковой в условиях Земли, составляет по группе космонавтов от 1 мин 6 с до 6 мин 48 с за сутки полета, несколько увеличиваясь к заключительному этапу полета. Выделение времени взаимодействия с опорой в диапазонах, различающихся относительно веса тела на Земле, было обусловлено нашим предположением о преимущественном влиянии времени стимуляции с интенсивностью, сравнимой с условиями Земли, т.е. больше веса тела. Кроме того, в условиях КП рецепторы опоры, расположенные на стопе, могут оказаться менее чувствительны к более низко-



**Рис. 2.** Диаграмма рассеяния изменений электромиограммы камбаловидной мышцы при выполнении ходьбы после полета (ось ординат) и времени взаимодействия с опорой в локомоторной тренировке (ось абсцисс).

Коэффициент корреляции Спирмана  $\rho = -0.650$ .

му уровню стимуляции, чем вес тела человека в условиях гравитации Земли, так как при длительном пребывании в условиях невесомости порог чувствительности рецепторов опоры преимущественно снижается [3]. В результате исследования выявлена значимая взаимосвязь только между общим временем стимуляции рецепторов опоры и послеполетными изменениями ЭМГ камбаловидной мышцы. Связь между временем взаимодействия в диапазонах различной интенсивности с изменениями ЭМГ камбаловидной мышцы при выполнении ходьбы не обнаружена. Можно предположить, что в сохранении ЭМГ-свойств камбаловидной мышцы ведущую роль играет взаимодействие с опорой, напоминание об опоре, а не интенсивность взаимодействия, однако это предположение нуждается в дальнейшей проверке.

В перспективе планируется оценка изменения вклада икроножной и передней большеберцовой мышц в реализацию ходьбы после длительного пребывания в условиях невесомости, что позволит дать обоснованные рекомендации по реализации реабилитационных мероприятий после полета. Расширение представления гравитационной физиологии о влиянии опоры на изменение свойств мышц возможно после анализа данных космического эксперимента “Профилактика-2”, где используется компенсатор опорной разгрузки в реальном КП.

## ВЫВОДЫ

1. Продолжительность стимуляции рецепторов опоры за время локомоторной тренировки варьировала в диапазоне от 20 до 30 мин в сутки,

большая часть времени стимуляции опорного входа соответствовала величинам опорных реакций, не превосходящим вес тела космонавта на Земле.

2. Среднее время стимуляции рецепторов опоры в результате локомоторных тренировок в группе космонавтов, выполняющих тренировки согласно бортовой документации, составило 25 мин 52 с за сутки, среднее время воздействия опоры с интенсивностью больше веса тела составило 3 мин 1 с.

3. Увеличение времени взаимодействия с опорой во время локомоторной тренировки в длительном космическом полете сопровождалось уменьшением послеполетных изменений ЭМГ камбаловидной мышцы при выполнении ходьбы. Этот вывод можно считать предварительным; дальнейшие исследования будут направлены на проверку его достоверности.

**Этические нормы.** Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и были одобрены Комиссией по биомедицинской этике Института медико-биологических проблем РАН (Москва).

**Информированное согласие.** Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

**Финансирование работы.** Работа поддержана базовым финансированием РАН 63.1.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность космонавтам, принявшим участие в эксперименте, сотрудникам Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина и врачам экипажей за предоставленную возможность проведения до- и послеполетных обследований.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Е.И., Егоров А.Д., Какурин Л.И., Нефедов Ю.Г. Медицинское обеспечение и основные результаты обследования экипажа космического корабля "Союз-9" // Космическая биология. 1970. № 6. С. 26.
2. Григорьев А.И., Козловская И.Б., Маркин А.А. и др. Годичная антиортостатическая гипокинезия (АНОГ) — физиологическая модель межпланетного космического полета. М.: РАН, 2018. 288 с.
3. Козловская И.Б. Гравитация и позно-тоническая двигательная система // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51. № 3. С. 5.  
*Kozlovskaya I.B.* Gravity and the tonic postural motor system // Human Physiology. 2018. V. 44. № 7. P. 725.
4. Григорьев А.И., Козловская И.Б., Шенкман Б.С. Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 5. С. 507.  
*Grigor'ev A.I., Kozlovskaya I.B., Shenkman B.S.* [The role of support afferents in organisation of the tonic muscle system] // Ross. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenova. 2004. V. 90. № 5. P. 508.
5. Шенкман Б.С., Мирзоев Т.М., Козловская И.Б. Тоническая активность и гравитационный контроль постуральной мышцы // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 6. С. 58.
6. Куренская А.В., Козловская И.Б., Сирота М.Г. Влияние иммерсионной гипокинезии на характеристики ритмической активности двигательных единиц камбаловидной мышцы // Физиология человека. 1986. Т. 12. № 4. С. 627.  
*Kirenskaya A.V., Kozlovskaya I.B., Sirota M.G.* Effect of immersion hypokinesia on rhythmic activity of soleus motor units // Human Physiology. 1986. V. 12. № 4. P. 275.
7. Sayenko D., Artamonov A.A., Ivanov O.G., Kozlovskaya I.B. Effect of 6 days of support withdrawal on characteristics of balance function // ESA Special Publication. 2005. V. 585. P. 31.
8. Fitts R.H., Riley D.R., Widrick J.J. Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle // J. Appl. Physiol. 2000. V. 89. № 2. P. 823.
9. Попов А.А., Меркульева Н.С., Вещицкий А.А. и др. Влияние опорного стимула на кинематику локомоторных движений в условиях моделируемой микрогравитации / Материалы XXIII съезда Физиологического общества им. И.П. Павлова с международным участием. Воронеж, 18–22 сентября 2017. С. 286.
10. Popov D.V., Saenko I.V., Vinogradova O.L., Kozlovskaya I.B. Mechanical stimulation of foot support zones for preventing unfavorable effects of gravitational unloading // J. Gravit. Physiol. 2003. V. 10. № 1. P. 59.
11. Мельник К.А., Миллер Т.Ф., Шпаков А.В., Козловская И.Б. Изменение электромиографических параметров локомоций при механической стимуляции опорных зон стоп во время 7-суточной сухой иммерсии // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2007. Т. 41. № 6–1. С. 41.
12. 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. Т. 44. № 1. С. 56.  
*Fomina E.V., Lysova N.Y., Savinkina A.O.* Axial Load during the Performance of Locomotor Training in Microgravity as a Factor of Hypogravity Countermeasure Efficiency // Human Physiology. 2018. V. 44. № 1. P. 47.
13. Fomina E.V., Lysova N.Y., Kukoba T.V. et al. One-year mission on ISS is a step towards interplanetary missions // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2017. V. 88. № 12. P. 1094.
14. Степанцов В.И., Тихонов М.А., Еремин А.В. Физиологическая тренировка как метод предупреждения ги-



- подинамического синдрома // Космич. биол. и авиакосм. мед. 1972. Т. 6. С. 64.
15. Степанцов В.И., Еремин А.В. Зависимость между характером физической тренировки и переносимостью поперечных перегрузок / Физиологические проблемы детренированности. М.: ВНИИФК, 1970. С. 267.
  16. McCrory J.L., Derr J., Cavanagh P.R. Locomotion in simulated zero gravity: ground reaction forces // Aviat. Space Environ. Med. 2004. V. 75. № 3. P. 203.
  17. Genc K.O., Mandes V.E., Cavanagh P.R. Gravity replacement during running in simulated microgravity // Aviat. Space Environ. Med. 2006. V. 77. № 11. P. 1117.
  18. Cavanagh P., Rice A., Glauberman M., Sudduth A. et al. Ground reaction forces during reduced gravity running in parabolic flight // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2017. V. 88. № 8. P. 730.
  19. Gosseye T.P., Willems P.A., Heglund N.C. Biomechanical analysis of running in weightlessness on a treadmill equipped with a subject loading system // Eur. J. Appl. Physiol. 2010. V. 110. № 4. P. 709.
  20. De Witt J.K., Ploutz-Snyder L.L. Ground reaction forces during treadmill running in microgravity // J. Biomech. 2014. V. 47. № 10. P. 2339.
  21. Genc K.O., Gopalakrishnan R., Kuklis M.M et al. Foot forces during exercise on the International Space Station // J. Biomech. 2010. V. 43. № 15. P. 3020.
  22. Guo N., Fan X., Wu Y. et al. Effect of constraint loading on the lower limb muscle forces in weightless treadmill exercise // J. Healthc Eng. 2018. V. 2018. ID 8487308. <https://doi.org/10.1155/2018/8487308>
  23. Kozlovskaya I.B., Yarmanova E.N., Yegorov A.D. et al. Russian countermeasure systems for adverse effects of microgravity on long-duration ISS flights // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2015. V. 86. № 12. P. 24.
  24. Соськин В.Д., Егоров А.Д., Зайцева В.В. и др. Экспертная система управления физическими тренировками экипажа в длительном космическом полете // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2003. Т. 37. № 5. С. 41.  
Son'kin V.D., Egorov A.D., Zaitseva V.V. et al. [An expert system for controlling the physical training program of crews on long-term space missions] // Aviakosm. Ekolog. Med. 2003. V. 37. № 5. P. 41.
  25. Lacquaniti F., Ivanenko Y.P., Sylos-Labini F. et al. Human locomotion in Hypogravity: from basic research to clinical applications // Front. Physiol. 2017. V. 8. P. 893.
  26. Cromwell R.L., Scott J.M., Downs M. et al. Overview of the NASA 70-day bed rest study // Med. Sci. Sports Exerc. 2018. V. 50. № 9. P. 1909.
  27. Mahoney S.J., Dicks N.D., Lyman K.J. et al. Acute Cardiovascular, Metabolic, and Muscular Responses to Blood Flow Restricted Rowing Exercise // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2019. V. 90. № 5. P. 440.
  28. Konda N.N., Karri R.S., Winnard A. et al. A comparison of exercise interventions from bed rest studies for the prevention of musculoskeletal loss // NPJ Microgravity. 2019. V. 5. Article 12.
  29. Steele J., Androulakis-Korakakis P., Perrin C. et al. Comparisons of resistance training and 'cardio' exercise modalities as countermeasures to microgravity induced physical deconditioning: New perspectives and lessons learned from terrestrial studies // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 1150.
  30. Maffiuletti N.A., Green D.A., Vaz M.A., Dirks M.L. Neuromuscular electrical stimulation as a potential countermeasure for skeletal muscle atrophy and weakness during human spaceflight // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 1031.
  31. Козловская И.Б., Ярманова Е.Н., Фомина Е.В. Российская система профилактики: настоящее и будущее // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2013. Т. 47. № 1. С. 13.  
Kozlovskaya I.B., Yarmanova E.N., Fomina E.V. [Russian system of countermeasures: the present and future] // Aviakosm. Ekolog. Med. 2013. V. 47. № 1. P. 13.
  32. Ryder J.W., Fullmer P., Buxton R.E. et al. A novel approach for establishing fitness standards for occupational task performance // Eur. J. Appl. Physiol. 2019. V. 119. № 7. P. 1633.
  33. Coulombe J.C., Senwar B., Ferguson V.L. Spaceflight-induced bone tissue changes that affect bone quality and increase fracture risk // Curr. Osteoporos. Rep. 2020. V. 18. № 1. P. 1.
  34. Prisk G.K. Effects of Partial Gravity on the Function and Particle Handling of the Human Lung // Curr. Pathobiol. Rep. 2018. V. 6. № 3. P. 159.
  35. Nicogossian A.E., Williams R.S., Huntoon C.L et al. Space Physiology and Medicine from Evidence to Practice. 4th ed. New York: Springer, 2016. 509 p.

## Role of Support Receptor Stimulation in Locomotor Training for the Prevention of Hypogravitational Disorders

E. V. Fomina<sup>a, b, \*</sup>, N. Yu. Lysova<sup>a</sup>, A. O. Savinkina<sup>a</sup>, R. Yu. Zhedyaev<sup>a, \*\*</sup>,  
N. A. Senatorova<sup>a</sup>, T. B. Kukoba<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Institute of Biomedical Problems, RAS, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia

\*E-mail: fomin-fomin@yandex.ru

\*\*E-mail: zhedyaev-r@mail.ru

The analysis of support receptors stimulation time per day in locomotor training was carried out individually for thirteen cosmonauts who have completed a long space flight. The time of support receptors stimulation

with an intensity comparable to that under 1G conditions was shorter compared to Earth conditions. Negative correlation was found between average daily time of support stimulation and the magnitude of changes in the post-flight electromyographic response of soleus muscle to walking. It is proposed to consider the time of support receptors stimulation along with such parameters as value of axial loading and the proportion of trackbed passive mode of movement as a significant indicator for personalized approach to the organization of prevention of hypogravitational disorders during long-term space flights.

*Keywords:* gravitational physiology, support afferentation, prevention system, locomotor training, long-term space flight, electromyographic cost.