

УДК: 612.816

МЕХАНИЧЕСКАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП КАК СРЕДСТВО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ

© 2024 г. М. П. Бекренева^{1, *}, А. А. Савеко¹, О. Э. Курбанова¹, А. М. Рябова¹,
Т. А. Шигуева¹, Е. С. Томиловская¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, 123007 Москва, Хорошевское шоссе, 76А, Россия

*E-mail: mbekreneva@gmail.com

Поступила в редакцию 30.06.2024 г.

После доработки 24.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Явления, возникающие в ответ на снижение уровня опорной афферентации, – рефлекторное снижение мышечного тонуса, структурные изменения мышечной периферии, нарушения координации движений – наблюдаются как в условиях невесомости и наземных моделях ее физиологических эффектов, так и у иммобилизованных пациентов, пожилых людей. Формирование концепции триггерной роли опорной афферентации в работе позно-тонической мышечной системы послужило толчком для развития метода опорной стимуляции в качестве меры профилактики негативных последствий двигательной разгрузки.

Данный обзор посвящен рассмотрению результатов применения метода механической стимуляции опорных зон стоп в предотвращении негативных последствий опорной и двигательной разгрузки в практике космической и земной медицины.

Ключевые слова: опорная афферентация, опорная стимуляция, двигательная разгрузка, микрогравитация, реабилитация.

DOI: 10.31857/S0235009224040017 **EDN:** ADGVBE

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что последствия влияний различных факторов космического полета, в частности фактора невесомости, в той или иной степени встречаются и в земной жизни в условиях гиподинамии, гипокинезии, деафферентации и т.д. (Orlov et al., 2022). Гипокинезия и гиподинамия являются актуальными проблемами современного общества и представляют собой ограничение двигательной активности, которое обусловлено малоподвижным образом жизни, спецификой профессиональной деятельности или длительной иммобилизацией, связанной с восстановительным периодом после травм, инсульта, хирургического вмешательства, а также с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Подобные проблемы возникают и у лиц пожилого возраста, которые постепенно снижают свою двигательную активность вследствие хронических болезней или иных обстоятельств. Очевидно, что двигательная разгрузка сопровождается общим снижением

гравитационной нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Исследования функционирования сенсомоторной системы человека в условиях космического полета позволили отметить, что устранение опорной нагрузки в условиях микрогравитации сопровождается существенным снижением опорного афферентного притока от стоп (DeWitt, Ploutz-Snyder, 2014; Fomina et al., 2017; Saveko et al., 2021), что играет ключевую роль в развитии целого ряда негативных последствий двигательной разгрузки (Козловская, 2004). Например, усиливается распад белков саркомерного скелета (Шенкман и др., 2017), может ускоряться процесс деминерализации костной ткани (Свешников и др., 2005).

Концепция триггерной роли опорной афферентации в организации и контроле работы позно-тонической мышечной системы была подтверждена в серии экспериментальных исследований с применением метода механической стимуляции опорных зон стоп в режиме

естественных локомоций (Козловская, 2004; Григорьев и др., 2004; Шенкман и др., 2017). В ряде исследований показано, что устранение опорной нагрузки может запустить каскад нейромоторных адаптаций, начинающихся с изменения порядка вовлечения двигательных единиц в мышцах-разгибателях голени, активно участвующих в контроле позы (Киренская и др., 1986; Шигуева и др., 2013), и, в конечном счете, приводящих к нарушению координации движений. К наиболее выраженным последствиям снижения опорной и двигательной нагрузки относятся: снижение доли вовлечения тонических при одновременном увеличении доли вовлечения фазных мышц в локомоторных движениях (Melnik et al., 2003); снижение поперечной жесткости мышц (Григорьев и др., 2004) и уменьшение размеров мышечных волокон (Шенкман и др., 2003), а также максимальной произвольной силы мышц голени (Popov et al., 2003; Miller et al., 2004); снижение абсолютной силы одиночных скинированных мышечных волокон в изометрическом сокращении, вызванном ионами кальция (Widrick et al., 1999; Шенкман и др., 2003; Григорьев и др., 2004); выявление процессов трансформации миозинового фенотипа в быструю сторону (Шенкман и др., 2003; Григорьев и др., 2004). Таким образом, снижение гравитационной нагрузки закономерно сопровождается глубокими нарушениями во всех звеньях двигательной системы – сенсорных системах, мышечном аппарате и центральных отделах системы управления движениями, что в совокупности получило название гипогравитационного двигательного синдрома (Козловская, 2018; Томиловская и др., 2021). При этом применение метода механической стимуляции опорных зон стоп в режимах, моделирующих естественные локомоции (медленная ходьба – 75 шаг/мин, быстрая ходьба – 120 шаг./мин; величина оказываемого давления – 40 кПа) устраняло в условиях безопорности все вышеперечисленные эффекты (Григорьев и др., 2004; Шенкман и др., 2017). Позже аналогичные результаты о влиянии опорной стимуляции на предотвращение негативных последствий опорной и двигательной разгрузки были также получены Layne и Forth (Layne, Forth, 2008), которые показали, что применение опорной стимуляции эффективно снижает негативные последствия разгрузки.

Более того, с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) были получены уникальные данные о влиянии механической стимуляции опорных зон стоп на центральную нервную систему (Кремнева и др., 2013; Черникова и др., 2013; Labriffe et al., 2017; Pechenkova et al., 2019). Так, Кремнева и соавторы (Кремнева и др., 2013) показали, что

данная стимуляция вызывает в обоих полушариях головного мозга активацию первичной сенсомоторной коры и ассоциативных сенсорных областей, которые важны для построения и выполнения локомоторных программ (Черникова и др., 2013). Печенкова и соавторы (Pechenkova et al., 2019) в фМРТ-исследовании, направленном на изучение функциональных связей мозга после длительного космического полета, выявили значительные функциональные изменения в нейронных сетях, связанных с ходьбой, что, тем самым, подчеркнуло значительный вклад фактора опорной разгрузки в развитие выявленных изменений в головном мозге.

Эффективность применения механической опорной стимуляции с целью предотвращения структурных и функциональных изменений опорно-двигательного аппарата, вызванных пребыванием в условиях опорной и двигательной разгрузки, проверялась в исследованиях с участием не только людей, но и животных. Еще до формирования концепции о роли опорной афферентации в регуляции работы позно-тонической системы, а именно в исследованиях, проведенных с участием животных – крыс с вывешенными конечностями, регистрировали положительное влияние опорной стимуляции в предотвращении мышечной атрофии (De-Doncker et al., 2000). Немного позже, одновременно с работами И.Б. Козловской, А.И. Григорьева и Б.С. Шенкмана с участием человека, в экспериментах с участием крыс была показана эффективность опорной стимуляции в предотвращении атрофических изменений позно-тонической мышцы (Nemirovskaya, Shenkman, 2002; Kyparos et al., 2005). Более того, работы последних 5 лет позволяют более глубоко понять механизмы действия опорной стимуляции. Так, Тыганов и соавторы (Tyganov et al., 2021) в исследовании NOS-зависимых эффектов подошвенной стимуляции на механические характеристики белков цитоскелета камбаловидной мышцы крысы показали, что использование данного метода во время 7-суточного вывешивания задних конечностей позволяет предотвращать снижение пассивной жесткости и силы камбаловидной мышцы, а также сохранять на исходном уровне транскрипцию мРНК и содержание белков цитоскелета NOS-зависимым образом. Позже Шарло и соавторы (Sharlo et al., 2022) показали, что механическая стимуляция опорных зон стоп у крыс при подвешивании задних конечностей, посредством поддержания мышечной тонической активности, приводит к сохранению фенотипа медленно сокращающихся окислительных волокон камбаловидной мышцы и устойчивости к утомлению за счет

корегуляции экспрессии генов медленного типа и мышечного окислительного метаболизма.

Подтвержденная уникальность метода механической стимуляции заключается в том, что оказание давления в режиме естественных локомоций на опорные зоны стоп, характеризующиеся максимальной плотностью кожных механорецепторов (телец Мейснера и Фаттера-Пачини), формирует мощный афферентный поток и оказывает регулирующее действие на структуры центральной нервной системы, контролирующей движение, стимулируя процессы нейропластичности (Кремнева и др., 2013; Шенкман и др., 2017; Labriffe et al., 2017; Pechenkova et al., 2019).

Схожесть явлений, возникающих вследствие устранения опоры, и, следовательно, снижения уровня опорной афферентации в условиях невесомости и ее моделях (Kozlovskaya, 2004; 2018; Шенкман и др., 2020; Moore et al., 2019; Saveko et al., 2023), а также у пациентов, иммобилизованных в течение длительного времени, и у пожилых людей (Ратушный, Буравкова, 2023; Pandiarajan, Hargens, 2020), стали основанием для применения метода механической стимуляции опорных зон стоп с целью устранения негативного влияния гипогравитации на двигательную систему человека в наземной медицине (Motanova et al., 2022).

Цель данного обзора состояла в объединении информации о результатах применения метода механической стимуляции опорных зон стоп в качестве меры профилактики негативных последствий опорной и двигательной разгрузки в условиях микрогравитации, наземных моделях, а также у иммобилизованных пациентов вследствие травм и нарушений работы опорно-двигательного аппарата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

Впервые концепция влияния кожных афферентов и механорецепторов в стопе человека на модуляцию постурально-тонической системы млекопитающих возникла в ходе экспериментов, выполненных в условиях микрогравитации и “сухой” иммерсии (СИ) (Козловская, 2004; Kozlovskaya et al., 2007b; Григорьев и др., 2004). При этом первые результаты применения опорной стимуляции стоп были получены в ходе совместного советско-кубинского эксперимента “Суппорт” (Эрнандес Корво и др., 1981). В ходе данного 7-суточного космического эксперимента кубинский космонавт, с целью изучения возможностей

профилактики изменений структурно-функциональных свойств стопы и других двигательных нарушений, использовал устройство “КУПУЛА САНД-501” – сандалии с подпружинными индивидуальными профилированными супинаторами, оказывающими дозированное постоянное давление в диапазоне от 20 до 60 мм рт. ст. на свод стопы. Данное устройство было специально разработано и усовершенствовано в ходе модельных наземных экспериментов на базе Института медико-биологических проблем Министерства здравоохранения СССР (Эрнандес Корво и др., 1981; Егорова, 2011).

Полученные в ходе 7-суточного космического полета результаты доказали профилактический эффект применения метода опорной стимуляции с помощью устройства “КУПУЛА САНД-501”. Так, постоянное давление, которое устройство оказывало на стопу, уменьшало интенсивность вестибулярной иллюзии перевернутого пространства, а также сопровождалось проявлением рефлекса разгибания нижних конечностей, который обычно возникает в нормальной гравитационной среде под воздействием подошвенных раздражений и приводит к исправлению осанки и изменению механизмов пространственного контроля (Эрнандес Корво и др., 1981). Более того, по результатам исследования скоростно-силовых свойств мышц нижних конечностей, у кубинского космонавта после полета было отмечено некоторое увеличение (до 10%) момента силы икроножной и передней большеберцовой мышц на всех скоростных режимах, в том числе в изометрическом, по сравнению с предполетным уровнем.

Важным результатом данного эксперимента явились данные о положительном влиянии применения механической стимуляции на морфофункциональные свойства стоп, а также на позные и локомоторные характеристики кубинского космонавта. Согласно отчету И.Б. Козловской, систематическая тренировка с устройством “КУПУЛА САНД-501” до полета способствовала скорому исправлению пронационного положения таранной кости, которое возникло вследствие действия фактора безопорности, а также улучшению плантографического чернильного отпечатка стоп. При этом ежедневная профилактическая стимуляция в ходе полета обеспечила предплюсно-плюсневую устойчивость, внутреннюю функциональную линейность и сыгранность опорно-рессорного аппарата стопы. Более того, ежедневная стимуляция привела к повышению порогов вибрационной чувствительности опорных зон стоп, что способствовало более стабильной работе подошвенной поверхности всей стопы. Результаты регистрации распределения проекций общего центра тяжести (ОЦТ), полученные

с помощью измерений на тензометрической платформе до и на первый и третий дни после завершения полета, свидетельствовали о незначительных колебаниях площади проекции ОЦТ кубинского космонавта после возвращения на Землю, а также о тенденции к улучшению позной рефлексии, что, по мнению авторов, было достигнуто за счет использования профилактического устройства. Стоит также отметить, что согласно данным киноциклограмм обычной ходьбы, полученным в пред- и послеполетный периоды, у кубинского космонавта более равномерными и стабильными, чем у советского, оказались траектории перемещения тазобедренного, коленного и голеностопного суставов во время ходьбы (Эрландес Корво и др., 1981).

Результаты применения устройства для постоянной механической стимуляции опорных зон стоп в ходе эксперимента “Суппорт” указывают на его профилактическую эффективность. Однако результаты этого эксперимента не позволили сделать авторам окончательные выводы, так как в нем принимало участие только 2 космонавта. Несмотря на это, полученный опыт использования данного метода стал основанием для дальнейшего изучения роли опорной афферентации в системе моторного контроля, а также развития метода опорной стимуляции с целью профилактики негативных последствий воздействия фактора гипогравитации.

Следует отметить, что на сегодняшний день уже усовершенствованный метод механической стимуляции опорных зон стоп (с применением стимуляции в режиме естественных локомоций в зонах пятки и плюсны) используется в локомоторных тренировках для профилактики гипогравитационных нарушений на борту Международной космической станции (Фомина и др., 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП В УСЛОВИЯХ НАЗЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ БЕЗОПОРНОСТИ И ДВИГАТЕЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ

Модель “сухая” иммерсия

“Сухая” иммерсия (СИ) является одной из наиболее широко используемых наземных моделей микрогравитации, которая точно и быстро воспроизводит такие факторы космического полета, как опорная, двигательная и весовая аксиальная разгрузка (Tomilovskaya et al., 2019; Saveko et al., 2023). Как уже упоминалось ранее, именно в условиях СИ была начата серия исследований

с участием 18 здоровых испытуемых-добровольцев, направленная на подтверждение положения о триггерной роли опорной афферентации в регуляции структурно-функциональных свойств тонической мышечной системы (Григорьев и др., 2004). В ходе этих исследований применяли разработанный сотрудниками ГНЦ РФ – ИМБП РАН и НПО “Звезда” компенсатор опорной разгрузки (КОР). Данное устройство, представляющее собой ботинки с вложенными в них пневматическими стельками, оказывало механическое попеременное давление с силой $0,5 \pm 0,1$ кг/см² на опорные зоны стоп – плюсну и пятку – в режиме естественных локомоций (75 и 120 шагов в минуту). Стимуляцию в ходе 7-суточной СИ проводили ежедневно в течение 6 часов по 20 минут в начале каждого часа.

Результаты наземных модельных исследований подтвердили гипотезу о триггерной роли опорной афферентации в развитии гипогравитационного двигательного синдрома в строгих контролируемых экспериментальных условиях (Григорьев и др., 2004; Kozlovskaya et al., 2007a; 2007b; Layne, Forth, 2008; Popov et al., 2003; Khusnutdinova et al., 2004; Litvinova et al., 2004; Miller et al., 2004; Moukhina et al., 2004; Shenkman et al., 2004a; 2004b; Netreba et al., 2005; Tomilovskaya et al., 2019). Так, Попов и соавторы (Popov et al., 2003) показали, что снижение поперечной жесткости камбаловидной мышцы в группе испытуемых, которые применяли механическую стимуляцию опорных зон стоп, достигало достоверных значений лишь к шестым суткам иммерсионного воздействия, в то время как в контрольной группе уже к концу первых суток жесткость этой мышцы снижалась в среднем на 30%. Кроме того, применение опорной стимуляции позволило полностью предотвратить снижение амплитуды электромиограммы покоя камбаловидной мышцы в ходе СИ, а также снижение ее максимальной изокинетической силы после завершения СИ (Sayenko et al., 2003; Litvinova et al., 2004; Григорьев и др., 2004; Саенко и др., 2010; Миллер, 2010). В ряде работ получили аналогичные результаты при исследовании жесткостных и электромиографических характеристик передней большеберцовой мышцы голени (Григорьев и др., 2004; Miller et al., 2004; 2005; 2010). Стимуляционные воздействия в ходе СИ позволили также предотвратить структурные изменения мышечного аппарата – в группе с применением опорной стимуляции отсутствовали изменения площади поперечного сечения мышечных волокон, не наблюдалось уменьшения доли волокон, содержащих медленные изоформы тяжелых цепей миозина, а также снижения чувствительности миофибрилл к свободным ионам кальция (Григорьев и др., 2004; Moukhina et al.,

2004; Шенкман и др., 2017). Огнева и соавторы (Огнева и др., 2011) показали, что применение механической стимуляции зон стоп приводит к увеличению содержания белка десмина, а также выдвинули предположение, что подобное повышение являлось причиной увеличения жесткости сарколеммы при активации сокращения мышечного волокна.

Применение опорной стимуляции также было эффективным в предотвращении увеличения венозной растяжимости и ортостатической неустойчивости (Vinogradova et al., 2002). Интересно, что намного позже коллектив Амировой и соавторов (Amirova et al., 2016) в исследовании влияния опорной стимуляции на реакции сердечно-сосудистой системы в ходе тестирования ортостатической устойчивости не обнаружили улучшения ортостатической переносимости и существенного влияния стимуляции на число аномальных реакций сердечно-сосудистой системы. Однако стоит учитывать, что в исследовании, проведенном Виноградовой и соавторами (Vinogradova et al., 2002), стимуляция подошвы стопы применялась в качестве ежедневной меры профилактики (20 мин/ч каждые 6 ч, т.е. 2 ч/сут) в течение 7 суток иммерсионного воздействия, в то время как Амирова и соавторы оценивали только воздействие стимуляции подошвы стопы на сердечно-сосудистую систему в нормальных условиях.

Закирова и соавторы (Закирова и др., 2015) при исследовании характеристик Н-рефлекса камбаловидной мышцы у человека показали, что применение опорной стимуляции в ходе 7-суточной СИ оказывало модулирующее влияние на спинальную рефлекторную возбудимость, предотвращая развитие гиперрефлексии, подтвердив ранее полученные Bastani (Bastani et al., 2010) данные об эффектах влияния механической стимуляции подошвы стопы на возбудимость мотонейронного пула камбаловидной мышцы (значительное снижение возбудимости) в нормальных условиях.

В исследовании порядка вовлечения двигательных единиц (ДЕ) мышц-экстензоров голени в задаче удержания небольшого усилия (5–7% от максимальной произвольной силы) показано, что в условиях опорной разгрузки порядок рекрутирования ДЕ отчетливо изменяется, опровергая закон Хеннемана: значительно увеличивается число вовлеченных в выполнении двигательной задачи ДЕ с высокими значениями межимпульсных интервалов (больших ДЕ), практически не участвующих в выполнении подобных задач в нормальных условиях. Применение в ходе “сухой” иммерсии механической стимуляции опорных зон стоп способствовало сохранению

нормального порядка рекрутирования с преимущественным вовлечением в удержание небольшого усилия малых тонических ДЕ (Шигуева и др., 2013).

Более того, использование в условиях СИ метода механической стимуляции опорных зон стоп с помощью компенсатора опорной разгрузки позволило предотвратить и изменения таких интегральных двигательных актов, как локомоции. Так, Мельник и соавторы (Мельник и др., 2006) в исследовании биомеханических характеристик локомоций показали, что стимуляция опорных зон стоп в режиме естественной ходьбы не изменяла энергозатраты мышц, однако нивелировала увеличение амплитуды колебаний угловых параметров, характеризующих движения в коленном суставе при ходьбе, наблюдавшееся после 7-суточного иммерсионного воздействия в группе без средств профилактики.

Механическая опорная стимуляция в режиме естественных локомоций в условиях опорной разгрузки оказывает благоприятное влияние и на зрительно-вестибулярную функцию. В группе испытуемых без стимуляции наблюдались заметные разнонаправленные отклонения в параметрах следящих движений глаз, тогда как в группе испытуемых с механостимуляцией опорных зон стоп эти параметры были близки к исходным значениям. Опорная стимуляция также стабилизировала функцию плавного зрительного слежения (Kornilova et al., 2004).

Модель опорной разгрузки методом вывешивания нижних конечностей

В дальнейшем влияние механической опорной стимуляции стоп в режиме естественных локомоций (75 и 120 шаг./мин) на работу спинального локomotorного центра было оценено Томиловской и соавторами (Томиловская и др., 2013) в исследовании с участием 20 здоровых испытуемых-добровольцев с использованием модели опорной разгрузки методом вывешивания ног (Gurfinkel et al., 1998; Томиловская и др., 2013). Авторы обнаружили, что ритмическое раздражение опорных зон стоп в режиме локомоции в значительном числе случаев (более 50%) провоцировало у испытуемых возникновение движений, паттерны которых были идентичны ходьбе. Кроме того, авторы отметили, что характеристики регистрировавшихся при движениях показателей электромиографической активности у испытуемых имели общие черты: индивидуальный паттерн локомоций воспроизводился даже в случае раздражений части опорного контура (только пятки или только одной ноги), а частота вызванных шагов не зависела от частотных характеристик стимуляции. Данное

исследование позволило показать, что стимуляция опорных зон стоп активирует структуры локомоторного генератора и что вызываемый этим раздражением эффект включает запуск не только ритмической, но и неритмической (позной) компоненты ходьбы.

Логическим продолжением описанной работы стало исследование Герасименко и соавторов (Gerasimenko et al., 2016), направленное на изучение интеграции сенсорных, спинномозговых и волевых нисходящих сигналов в регуляции локомоции человека. Авторы изучили конвергенцию чрескожной электрической спинальной стимуляции, механической стимуляции опорных зон стоп и произвольных усилий при активации локомоторных движений у здоровых испытуемых ($n = 6$) при поддержке всего веса тела в вертикальном положении (вертикальном вывешивании). При этом опорная стимуляция осуществлялась тем же методом, что и в работе Томиловской и соавторов (Томиловская и др., 2013). Авторы обнаружили, что опорная стимуляция вызывала всплеск электромиографической активности в мышцах-сгибателях и разгибателях голеностопного сустава у 84% испытуемых. Более того, комбинированная спинальная и опорная стимуляция вызывала более выраженные двигательные реакции, чем любой из методов по отдельности. Авторы предположили, что двигательные реакции, вызываемые только спинальной или только опорной стимуляцией, активируют различные, но перекрывающиеся друг с другом нейронные сети спинного мозга, а при одновременном включении ступенчатые реакции функционально дополняют друг друга. Кроме того, при индуцированном шагании наиболее значительная модуляция произвольного шага происходила в ответ на комбинированную спинальную и опорную стимуляции. Результаты данной работы подтвердили гипотезу об эффективности применения комбинации спинальной и опорной стимуляции для улучшения восстановления двигательного контроля у людей с неврологическими травмами и расстройствами (Gerasimenko et al., 2016).

Следствием описанных выше исследований явилось применение метода механической стимуляции опорных зон стоп в режиме локомоций в системе нейрореабилитации. С этой целью благодаря совместной работе ученых Института медико-биологических проблем Российской академии наук, специалистов ООО “Центр авиакосмической медицины и технологий” и компании ООО “ВИТ” (Санкт-Петербург, Россия) была создана новая итерация стимулятора: имитатор опорной нагрузки “Корвит”.

Совместимость новой модификации опорного стимулятора с работой МРТ дала возможность специалистам Научного центра неврологии РАН и Института медико-биологических проблем РАН не только исследовать локомоторные проекции опорной стимуляции в коре головного мозга, но и разработать функциональную пробу для контроля процессов реабилитации пациентов после инсульта (Черникова и др., 2013; Саенко и др., 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОПОРНЫХ ЗОН СТОП В КЛИНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Результаты применения устройства “Корвит” в реабилитации пациентов после инсульта позволили полагать, что в основе его терапевтического действия лежит процесс активации опорной афферентации, отвечающей за нормализацию соотношения процессов возбуждения и торможения в центральной нервной системе, что приводит к уменьшению спастичности мышц, а также развитию функциональных связей в головном мозге, способствующих восстановлению координации движений (Кремнева и др., 2013; Черникова и др., 2013; Глебова и др., 2014; Саенко и др., 2017). Преимуществом данного устройства является возможность его применения независимо от положения (сидя или лежа) и степени подвижности пациента (Черникова Л.А. и др., 2013).

Применение метода механической стимуляции опорных зон стоп в режиме естественных локомоций оказывает благоприятное влияние на локомоторные и поструральные характеристики у пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата (Шварков и др., 2011; Саенко и др., 2017; Титаренко и др., 2015). Высокая эффективность использования этой технологии отмечается при реабилитации и восстановлении пациентов с двигательной разгрузкой: на всех этапах реабилитации после инсульта (Шварков и др., 2011; Nordin et al., 2014), включая острый период (Глебова и др., 2014; Саенко и др., 2017), а также при черепно-мозговой травме (Петрова и др., 2019), длительной иммобилизации пациентов различного нозологического профиля, тяжелой полинейропатии (синдром Гийена–Барре) (Хорошун и др., 2012). Также показано, что механическая стимуляция опорных зон стоп эффективна в предотвращении развития ортостатической непереносимости при переломах костей нижних конечностей (Serova et al., 2012), а также при комплексной реабилитации после повреждений спинного мозга (Виссарионов и др., 2016; Shapkova et al., 2021) и травм позвоночника (Shapkova et al., 2017; Толстая и др., 2023). Кроме того, несмотря

на иную этиологию заболевания опорно-двигательного аппарата, нельзя не отметить высокую эффективность применения механической стимуляции опорных зон стоп при детском церебральном параличе (Левченкова и др., 2012; Притыко и др., 2019).

Проведенный анализ литературных данных позволяет отметить высокую эффективность и результативность применения метода в реабилитационной практике. Таким образом, опорная стимуляция сопровождается активацией областей коры головного мозга, ответственных за построение и реализацию программ движений; нормализацией мышечного тонуса в нижних конечностях; активацией механизмов консолидации костей.

Конкретными примерами эффективного применения метода механической стимуляции стоп являются результаты, полученные в российских медицинских учреждениях. Так, в ГБУЗ “Центр патологии речи и нейрореабилитации ДЗМ” было проведено исследование эффективности применения подошвенного имитатора “Корвит” в программе комплексной нейрореабилитации у пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения (ОНМК; $n = 19$) и черепно-мозговыми травмами (ЧМТ; $n = 7$). У больных с ОНМК имел место левополушарный инсульт. ЧМТ была представлена последствиями ушиба головного мозга тяжелой степени ($n = 4$) или последствиями оперированной травматической субдуральной гематомы ($n = 3$). У всех больных отмечались выраженные двигательные и речевые нарушения. Помимо применения традиционной медикаментозной терапии, логопедических занятий, лечебной физкультуры, физиотерапевтического и других стандартных методов лечения, для всех больных проводили занятия с применением метода механической стимуляции опорных зон стоп устройством “Корвит”: 20 сеансов в течение 10 дней (по 2 процедуры в день). Стойкий положительный эффект получен у 93% больных с последствиями ОНМК и практически у всех больных с последствиями ЧМТ. В результате проводимой терапии у всех больных отмечена положительная динамика со стороны неврологического статуса. Наибольшие изменения отмечены со стороны нижних конечностей: увеличение мышечной силы, уменьшение спастичности и гиперрефлексии. В процессе лечения уменьшилась выраженность позы Верникс–Манна, больные стали увереннее ходить. Более того, специалисты отметили, что у всех больных повысилась активность двигательной стороны речевого акта, в сравнении с больными, не охваченными лечением данным методом (Шкловский и др., 2022).

Высокая эффективность применения устройства “Корвит” в комплексной реабилитации была также показана Шапковой и соавторами (Шапкова и др., 2013) во время проведения электростимуляции локомоторных центров спинного мозга в сочетании с опорной стимуляцией с целью восстановления локомоторных способностей при нижних параплегиях. Авторы показали, что воздействие прямоугольными импульсами длительностью 0,5 мс с базовой частотой 3 Гц на среднюю часть поясничного утолщения в течение 40–60 мин с одновременной ритмичной стимуляцией опорных зон стоп, имитирующей нагрузку при ходьбе (длительность цикла – 400, 500 и 800 мс; сила давления – 10–40 кПа), увеличило объем вызванных движений в голеностопных суставах в ходе стимуляции у пациентов, при этом эффект сохранялся и даже усиливался после остановки опорной стимуляции. В конце курса наблюдалось увеличение мышечной массы голени, переход к самостоятельной тетрапедальной ходьбе. Стоит подчеркнуть, что метод опорной стимуляции и электромиостимуляция отмечены авторами как взаимодополняющие методы.

Таким образом, опорная стимуляция в локомоторном режиме является надежным методом, показавшим эффективность в реабилитации пациентов с различными неврологическими и двигательными нарушениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специалисты в области реабилитации все чаще используют механическую стимуляцию опорных зон стоп, основанную на принципе пневматического давления на большие области стоп, содержащие максимальное число механорецепторов (Levchenkova et al., 2012; Глебова и др., 2014; Притыко и др., 2019). Здесь важно упомянуть, что существуют и другие методы механической опорной стимуляции, например, точечное давление на кожу стоп (Brognara, Cauli, 2020; Mauer et al., 2001), использование текстурированных поверхностей или обувных стелек (Leelachutidej et al., 2023; Qiu et al., 2013), а также подошвенный массаж (Yumin et al., 2017; Wikstrom et al., 2017). Однако есть все основания полагать, что метод механической стимуляции больших участков стоп, в частности с помощью устройства “Корвит”, является наиболее многообещающим в клинической практике (Кремнева и др., 2013; Черникова и др., 2013).

Подавляющее большинство исследований эффективности применения опорной стимуляции ограничиваются относительно небольшими сроками воздействия факторов опорной и двигательной разгрузки (как правило, не более недели экспозиции). Сведений о профилактической

результативности данного метода при более длительных экспозициях и более глубоких последствиях гипокинезии, иммобилизации или сниженной двигательной активности недостаточно.

Анализ эффектов опорной механостимуляции при длительных экспозициях в условиях космического полета или моделирования действия его факторов на Земле во многом является предметом будущих исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24–15–00309, <https://rscf.ru/project/24-15-00309/>.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Е.С. Томиловская, М.П. Бекренева, А.А. Савеко и Т.А. Шигуева внесли свой вклад в разработку основной идеи. М.П. Бекренева написала первый вариант рукописи. Е.С. Томиловская, А.А. Савеко, Т.А. Шигуева, О.Э. Курбанова и А.М. Рябова внесли свой вклад в доработку рукописи. М.П. Бекренева несла основную ответственность за окончательное содержание. Все авторы внесли свой вклад в редактирование рукописи и одобрили представленную версию.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виссарионов С. В., Солохина И. Ю., Икоева Г. А. и др. Двигательная реабилитация пациента с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы методом неинвазивной электростимуляции спинного мозга в сочетании с механотерапией. *Хирургия позвоночника*. 2016. Т. 13. № 1. С. 8–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2016.1.8-12>.
- Глебова О. В., Максимова М. Ю., Черникова Л. А. Механическая стимуляция опорных зон стоп в остром периоде среднетяжелого и тяжелого инсульта. *Вестник восстановительной медицины*. 2014. Т. 1. С. 71–75.
- 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. 507–521.
- Егорова О. В. Из истории российско-кубинского сотрудничества в космосе. *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция*, 2010. 2011. С. 553.
- Закирова А. З., Шигуева Т. А., Томиловская Е. С., Козловская И. Б. Влияние механостимуляции опорных зон стоп на характеристики Н-рефлекса в условиях безопорности. *Физиология человека*. 2015. Т. 41. № 2. С. 46–52. DOI: 10.7868/S0131164615020174
- Киренская А. В., Козловская И. Б., Сирота М. Г. Влияние иммерсионной гипокинезии на характеристики ритмической активности двигательных единиц камбаловидной мышцы. *Физиология человека*. 1986. Т. 12. № 1 С. 617–632.
- Козловская И. Б. Гравитация и позно-тоническая двигательная система. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 3. С. 5–21. DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-3-5-21
- Козловская И. Б. Опорная афферентация в контроле тонической мышечной активности. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*. 2004. Т. 90. № 8. С. 418–419.
- Корнилова Л. Н., Алехина М. И., Темникова В. В., Азаров К. А. Следящая функция глаз в условиях 7-суточной “сухой” иммерсии с применением компенсатора опорной разгрузки. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2004. Т. 38. № 6. С. 41–48.
- Кремнева Е. И., Саенко И. В., Черникова Л. А., Червяков А. В., Коновалов Р. Н., Козловская И. Б. Особенности активации зон коры головного мозга при стимуляции опорных рецепторов в норме и при очаговых поражениях ЦНС. *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 5. С. 86–92. DOI: 10.7868/S0131164613050093
- Левченкова В. Д., Семенова К. А. Современные представления о морфологической основе детского церебрального паралича. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. 2012. Т. 112. № 7–2. С. 4–8.
- Мельник К. А., Артамонов А. Л., Миллер Т. Ф., Воронцов А. В. Влияние механической стимуляции опорных зон стоп во время 7-суточной “сухой” иммерсии на кинематические параметры локомоций человека. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2006. Т. 40. № 5. С. 59–65.
- Миллер Т. Ф., Саенко И. В., Попов Д. В., Виноградова О. Л., Козловская И. Б. Влияние безопорности и стимуляции опорных зон стоп на характеристики поперечной жесткости и электромиограммы покоя мышц голени. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2010. Т. 44. № 6. С. 13–17.
- Огнева И. В., Шенкман Б. С., Козловская И. Б. Содержание десмина и альфа-актинина-1 в камбаловидной мышце человека после 7-суточной “сухой” иммерсии. *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 436. № 5. С. 709–711.

- Петрова Н. В., Трусов В. А., Киселев Н. П., Макиев Е. А. Возможности современных технологий нейрореабилитации в лечении последствий ЧМТ. *Вестник Совета молодых ученых и специалистов Челябинской области*. 2019. Т. 1. № 4. С. 43–46.
- Притыко А. Г., Чебаненко Н. В., Зыков В. П. и др. Опыт применения проприоцептивного моделирования ходьбы у детей раннего возраста с двигательными расстройствами. *Русский журнал детской неврологии*. 2019. Т. 14. № 3. С. 16–27. DOI: 10.17650/2073–8803–2019–14–3–16–27
- Свешников А. А., Смотров Л. А., Овчинников Е. Н. Механизмы деминерализации костной ткани. *Генный ортопедии*. 2005. № 2. С. 95–99.
- Саенко И. В., Кремнева Е. И., Глебова О. В. и др. Новые подходы в реабилитации больных с поражениями ЦНС, базирующиеся на гравитационных механизмах. *Физиология человека*. 2017. Т. 43. № 5. С. 118–128. DOI: 10.7868/S0131164617050137
- Серова Н. Ю., Тищенко М. К., Никишов С. О. Применение метода пневматической имитации опорной нагрузки при переломах костей голени у детей. *Вопросы современной педиатрии*. 2012. Т. 11. № 4. С. 74–80. DOI: 10.15690/vsp.v11i4.362
- Соловьева А. А., Седова Е. А., Томиловская Е. С., Шигуева Т. А., Афонин Б. В. Функциональная активность печени в условиях иммерсии и влияние на нее средств профилактики. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2014. Т. 48. № 2. С. 16–23.
- Титаренко Н. Ю., Левченкова В. Д., Семенова К. А., Батышева Т. Т., Доценко В. И. Современные нехирургические подходы к коррекции двигательных нарушений у больных церебральным параличом детей: обзор литературы. *Детская и подростковая реабилитация*. 2015. № 2. С. 71–79.
- Толстая С. И., Иванова Г. Е., Дуров О. В. и др. Реабилитация больных с заболеваниями и травмой шейного отдела позвоночника в раннем и позднем послеоперационном периоде (анализ российских и зарубежных рекомендаций). *Клиническая практика*. 2023. Т. 14. № 2. С. 54–65. DOI: 10.17816/clinpract472096
- Томиловская Е. С., Мошонкина Т. Р., Городничев Р. М. и др. Механическая стимуляция опорных зон стоп: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека. *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 5. С. 34. DOI: 10.7868/S0131164613050159
- Томиловская Е. С., Шенкман Б. С., Козловская И. Б. Гипогравитационный двигательный синдром: природа и механизмы развития. *Новые подходы к изучению проблем физиологии экстремальных состояний*. 2021. С. 77.
- Фомина Е. В., Лысова Н. Ю., Савинкина А. О. и др. Роль стимуляции рецепторов опоры в локомоторных тренировках для профилактики гипогравитационных нарушений. *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 3. С. 88–97. DOI: 10.31857/S013116462103005X
- Хорошун А. А., Пирадов М. А., Черникова Л. А. Новые технологии нейрореабилитации: имитатор опорной нагрузки при синдроме Гийена–Барре. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2012. Т. 6. № 1. С. 20–24.
- Черникова Л. А., Кремнева Е. И., Червяков А. В. и др. Новые подходы в изучении механизмов нейропластических процессов у больных с поражениями центральной нервной системы. *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 3. С. 54–60. DOI: 10.7868/S0131164613030053
- Шапкова Е. Ю., Емельяников Д. В., Ларионова Ю. Е. Сенсомоторные и локомоторные перестройки при хроническом посттравматическом поражении взрослого спинного мозга человека как свидетельство активность-зависимой нейропластичности. *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 4. С. 5–16. DOI: 10.31857/S0131164621040147
- Шапкова Е. Ю., Штырина Е. В., Саенко И. В., Козловская И. Б. Электростимуляция локомоторной зоны спинного мозга и пневмостимуляция опорной части стопы для восстановления локомоторных способностей при нижних параплегиях. “*Поленовские чтения*”: материалы XII научно-практической конференции. 2013. С. 418.
- Шварков С. Б., Титова Е. Ю., Мизиева З. М., Матвеева О. С., Бобровская А. Н. Применение методов комплексной проприоцептивной коррекции в восстановлении двигательных функций у больных инсультом. *Клиническая практика*. 2011. Т. 2. № 3. С. 3–8.
- Шенкман Б. С., Виноградова О. Л., Мазин М. Г. и др. Физиологическая стоимость физической нагрузки и объем митохондрий рабочих мышц у людей в условиях длительной гипокинезии. Эффекты резистивных локальных нагрузок. *Физиология человека*. 2003. Т. 29. № 2. С. 75–80.
- Шенкман Б. С., Григорьев А. И., Козловская И. Б. Гравитационные механизмы в тонической двигательной системе. Нейрофизиологические и мышечные аспекты. *Физиология человека*. 2017. Т. 43. С. 104–117. DOI: 10.7868/S0131164617050149
- 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. 58–72.
- Шигуева Т. А., Закирова А. З., Томиловская Е. С., Козловская И. Б. Влияние опорной разгрузки на порядок рекрутирования двигательных единиц. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2013. Т. 47. № 3. С. 50–53.

- Шкловский В. М., Фукалов Ю. А., Мамичева Е. Д. *Отчет о применении подошвенного имитатора опорной нагрузки (модель "КОРВИТ"). Центр патологии и нейрореабилитации ДЗ г. Москвы.* URL: <https://korvit.org/wp-content/uploads/2022/06/otzyv-czprin.pdf>
- Эрнандес Корво Р., Козловская И. Б., Крейдич Ю. В. и др. Эксперимент "Суппорт". *Исследование влияния 7-суточного космического полета на структуру и функцию опорного аппарата человека.* Гавана; Москва, 1981.
- Amirova L. E., Navasiolava N. M., Bareille M. P. et al. Effects of plantar stimulation on cardiovascular response to orthostatism. *European journal of applied physiology.* 2016. V. 116. P. 2257–2266.
- Bastani A., Hadian M. R., Talebian S., Bagheri H., Olyae G. R. Modulation of the ipsilateral and contralateral H reflexes following ipsilateral mechanical pressure of the foot in normal subjects // *Electromyography and Clinical Neurophysiology.* 2010. V. 50. P. 251–256.
- Brogna L., Cauli O. Mechanical plantar foot stimulation in Parkinson's disease: a scoping review. *Diseases.* 2020. V. 8. P. 12. DOI: 10.3390/diseases8020012
- De-Doncker L., Picquet F., Falempin M. Effects of cutaneous receptor stimulation on muscular atrophy developed in hindlimb unloading condition. *Journal of Applied Physiology.* 2000. V. 89(6). P. 2344–2351. DOI: 10.1152/jap.2000.89.6.2344.
- De Witt J. K., Ploutz-Snyder L. L. Ground reaction forces during treadmill running in microgravity. *Journal of biomechanics.* 2014. V. 47. P. 2339–2347.
- Fomina E. V., Savinkina A. O., Yarmanova E. N. Ground reaction force values in cosmonauts during locomotor exercises on board the International space station. *Hum. Physiol.* 2017. V. 43. P. 542–548. DOI:10.1134/S0362119717050048
- Gerasimenko Y., Gad P., Sayenko D. et al. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. *Journal of neurophysiology.* 2016. V. 116. P. 98–105. DOI:10.1152/jn.00146.2016
- Gurfinkel V. S., Levik Yu.S., Kazennikov O. V., Selionov V. A. Locomotor-like movements evoked by leg muscle vibration in humans. *European Journal of Neuroscience.* 1998. V. 10. P. 1608–1612. DOI: 10.1046/j.1460–9568.1998.00179.x
- Khusnutdinova D., Ntreba A., Kozlovskaya I. Mechanical stimulation of the soles support zones as a countermeasure of the contractile properties decline under microgravity conditions. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 141–2.
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Miller T. F. Erratum to: New approaches to counter measures of the negative effects of micro-gravity in long-term space flights: [Acta Astronautica 59 (2006) 13–19]. *Acta Astronautica.* 2007a. V. 60. P. 783–789. DOI: 10.1016/j.actastro.2006.09.038
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Sayenko D. G. et al. Role of support afferentation in control of the tonic muscle activity. *Acta Astronautica.* 2007b. V. 60. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.actastro.2006.08.010
- Kyparos A., Feedback D. L., Layne C. S., Martinez D. A., Clarke M. S. Mechanical stimulation of the plantar foot surface attenuates soleus muscle atrophy induced by hindlimb unloading in rats. *J. Appl. Physiol.* 2005. V. 99. P. 739–746. DOI: 10.1152/jap.2005.00771.2004
- Labriffe M., Annweiler C., Amirova L. E. et al. Brain activity during mental imagery of gait versus gait-like plantar stimulation: a novel combined functional MRI paradigm to better understand cerebral gait control. *Frontiers in Human Neuroscience.* 2017. V. 11. P. 106. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00106
- Layne C. S., Forth K. E. Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation. *Aviation, space, and environmental medicine.* 2008. V. 79(8). P. 787–794. DOI: 10.3357/ASEM.2293.2008
- Leelachutidej O., Srisawasdi G., Chadchavalpanichaya N., Sukthomya S. Influence of Textured Surface Insoles on Postural Control in Older Adults. *Journal of The Department of Medical Services.* 2023. V. 48. P. 45.
- Litvinova K. S., Vikhlyantsev I. M., Kozlovskaya I. B., Podlubnaya Z. A., Shenkman B. S. Effects of artificial support stimulation on fiber and molecular characteristics of soleus muscle in men exposed to 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 131–2.
- Maurer C., Mergner T., Bolha B., Hlavacka F. Human balance control during cutaneous stimulation of the plantar soles. *Neuroscience Letters.* 2001. V. 302. P. 45–48. DOI: 10.1016/S0304–3940(01)01655-X
- Miller T., Ivanov O., Galanov D., Guekht A., Sayenko I. Mechanical stimulation of the foot support zones as a way to maintain activity of the tonic muscular system during functional support deprivation. *J. Gravit. Physiol.* 2005. V. 12. P. 149–150.
- Miller T. F., Saenko I. V., Popov D. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Effect of mechanical stimulation of the support zones of soles on the muscle stiffness in 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 135–136.
- Moore S. T., Dilda V., Morris T. R. et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency. *Scientific reports.* 2019. V. 9. P. 2677. DOI: 10.1038/s41598–019–39058–9
- Motanova E., Bekreneva M., Rukavishnikov I. et al. Application of space technologies aimed at proprioceptive correction in terrestrial medicine in Russia. *Frontiers*

- in Physiology*. 2022. V. 13. P. 921862. DOI: 10.3389/fphys.2022.921862
- Moukhina A., Shenkman B., Blottner D., Nemirovskaya T. et al. Effects of support stimulation on human soleus fiber characteristics during exposure to “dry” immersion // *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 137–138.
- Nemirovskaya T. L., Shenkman B. S. Effect of support stimulation on unloaded soleus in rat. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. V. 87. P. 120–126. DOI: 10.1007/s00421-002-0603-7
- Nordin N., Xie S. Q., Wünsche B. Assessment of Movement Quality in Robot-Assisted Upper Limb Rehabilitation after Stroke: A Review. *J. NeuroEngineering Rehabilitation*. 2014. V. 11. P. 1–23. DOI: 10.1186/1743-0003-11-137
- Orlov O. I., Belakovskiy M. S., Kussmaul A. R., Tomilovskaya E. S. Using the Possibilities of Russian Space Medicine for Terrestrial Healthcare. *Front. Physiol.* 2022. V. 13. P. 921487. DOI: 10.3389/fphys.2022.921487
- Pandiarajan M., Hargens A. R. Ground-based analogs for human spaceflight. *Frontiers in physiology*. 2020. V. 11. P. 716. DOI: 10.3389/fphys.2020.00716
- Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A. et al. Alterations of functional brain connectivity after long-duration spaceflight as revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. P. 761. DOI: 10.3389/fphys.2019.00761
- Popov D. V., Saenko I. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Mechanical stimulation of foot support zones for preventing unfavourable effects of gravitational unloading. *J. Gravit. Physiol.* 2003 V. 10. P. 59–60.
- Qiu F., Cole M. H., Davids K. W. et al. Effects of textured insoles on balance in people with Parkinson's disease. *PLoS One*. 2013. V. 8. P. e83309. DOI: 10.1371/journal.pone.0083309
- Ratushnyy A. Y., Buravkova L. B. Microgravity Effects and Aging Physiology: Similar Changes or Common Mechanisms?. *Biochemistry (Moscow)*. 2023. V. 88. P. 1763–1777.
- Saveko A., Bekreneva M., Ponomarev I. et al. Impact of different ground-based microgravity models on human sensorimotor system. *Frontiers in Physiology*. 2023. V. 14. P. 1085545. DOI: 10.3389/fphys.2023.1085545
- Saveko A., Brykov V., Kitov V., Shpakov A., Tomilovskaya E. Adaptation in gait to lunar and martian gravity unloading during long-term isolation in the ground-based space station model. *Frontiers in human neuroscience*. 2022. V. 15. P. 742664. DOI: 10.3389/fnhum.2021.742664
- Sayenko I. V., Vinogradova O. L., Sayenko D. G. et al. Simulated support as a countermeasure against motor disorders during dry immersion // *In: Proc. International Congress “Motor control”*. Sofia. 2003.
- Shapkova E., Emeljannikov D., Shtyrina E., Mushkin A. Neurological Complications of Multisegmental Spine Reconstruction in Children: Post-Op Spinal Cord Electrical Stimulation (SCES) and Training Decrease Motor Deficit. *Global Spine Journal*. 2016. V. 6(1_suppl). P. s-0036–1582657. DOI: 10.1055/s-0036–1582657
- Sharlo K., Lvova I., Turtikova O. et al. Plantar stimulation prevents the decrease in fatigue resistance in rat soleus muscle under one week of hindlimb suspension. *Archives of biochemistry and biophysics*. 2022. V. 718. P. 109150. DOI: 10.1016/j.abb.2022.109150
- Shenkman B. S., Litvinova K. S., Nemirovskaya T. L. et al. Afferent and peripheral control of muscle fiber properties during gravitational unloading. // *J. Gravit. Physiol.* 2004a. V. 11. P. 111–114.
- Vinogradova O. L., Popov D. V., Saenko I. V., Kozlovskaya I. B. Muscle transverse stiffness and venous compliance under conditions of simulated supportlessness. *Life in Space for Life on Earth*. 2002. V. 501. P. 65–67.
- Shenkman B. S., Podlubnaya Z. A., Vihlyantsev I. M. et al. Contractile characteristics and sarcomeric cytoskeletal proteins of human soleus fibers in muscle unloading: role of mechanical stimulation from the support surface. *Biophysics*. 2004b. V. 49. P. 881–890.
- Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D., Rukavishnikov I., Kozlovskaya I. Dry immersion as a ground-based model of microgravity physiological effects. *Frontiers in physiology*. 2019. V. 10. P. 284. DOI: 10.3389/fphys.2019.00284
- Tyganov S. A., Mochalova E. P., Melnikov I. Y. et al. NOS-dependent effects of plantar mechanical stimulation on mechanical characteristics and cytoskeletal proteins in rat soleus muscle during hindlimb suspension. *The FASEB Journal*. 2021. V. 35. P. e21905. DOI: 10.1096/fj.202100783R
- Widrick J. J., Knuth S. T., Norenberg K. M. et al. Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres. *The Journal of physiology*. 1999. V. 516. P. 915–930. DOI: 10.1111/j.1469-7793.1999.0915u.x
- Wikstrom E. A., Song K., Lea A., Brown N. Comparative effectiveness of plantar-massage techniques on postural control in those with chronic ankle instability. *Journal of the Athletic Training*. 2017. V. 52. P. 629–635. DOI: 10.4085/1062-6050-52.4.02
- Yumin T. E., Simsek T. T., Sertel M., Ankarali H., Yumin M. The effect of foot plantar massage on balance and functional reach in patients with type II diabetes. *Physiotherapy Theory and Practice*. 2017. V. 33. P. 115–123. DOI: 10.1080/09593985.2016.1271849

MECHANICAL STIMULATION OF THE SOLES SUPPORT ZONES AS A COUNTERMEASURE OF NEGATIVE EFFECTS OF MOTOR UNLOADING

M.P. Bekreneva^{a,*}, A.A. Saveko^a, O.E. Kurbanova^a, A.M. Riabova^a, T.A. Shigueva^a, E.S. Tomilovskaya^a

^a State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of RAS, 123007 Moscow, Khoroshevskoe highway, 76A, Russia

*E-mail: mbekreneva@gmail.com

Phenomena that occur in response to a decrease in support afferentation, such as a reflex decrease in muscle tone, structural changes in the muscular periphery, and impaired coordination of movements, were observed both in microgravity and in ground-based models of its physiological effects, as well as in immobilized patients and the elderly. The discovery of the concept of the trigger role of support afferentation in the activity of postural-tonic muscle system led to the development of methods of the support stimulation as a countermeasure for the motor unloading negative consequences. This review aims to discuss the results of applying the method of mechanical stimulation of the soles support zones to mitigate negative consequences of the support and motor unloading in space and ground-based medical practice.

Keywords: support afferentation, support stimulation, motor unloading, microgravity, rehabilitation

REFERENCES

- Vissarionov S. V., Solokhina I. Yu., Ikoeva G. A. et al. Motor rehabilitation of patients with consequences of spinal cord injury using noninvasive electrical stimulation of the spinal cord combined with mechanotherapy. *Hirurgia pozvonochnika* [Spinal surgery]. 2016. V. 13. P. 8–12. DOI: 10.14531/ss2016.1.8–12 (in Russian).
- Glebova O. V., Maksimova M. Yu., Chernikova L. A. Mekhanicheskaya stimulyatsiya opornykh zon stop v ostrom periode sredne-tyazhelogo i tyazhelogo insulta [Mechanical stimulation of the supporting zones of the feet in the acute period of moderate and severe stroke]. *Vestnik vosstanovitel'noi meditsiny* [Bulletin of Restorative Medicine]. 2014. V. 1. P. 71–75 (in Russian).
- Grigoriev A. I., Kozlovskaya I. B., Shenkman B. S. The role of support afferents in organisation of the tonic muscle system. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal im. I. M. Sechenova* [I. M. Sechenov Russian Journal of Physiology]. 2004. V. 74. P. 675–675 (in Russian).
- Egorova O. V. Iz istorii rossiisko-kubinskogo sotrudnichestva v kosmose [From the history of Russian-Cuban cooperation in space.]. *Institut istorii estestvoznaniya i tekhniki im. S. I. Vavilova. Godichnaya nauchnaya konferentsiya, 2010* [Institute of the History of Natural Sciences and Technology named after S. I. Vavilova. Annual Scientific Conference, 2010]. 2011. P. 553–556 (in Russian).
- Zakirova A. Z., Shigueva T. A., Tomilovskaya E. S., Kozlovskaya I. B. Effects of Mechanical Stimulation of the Soles' Support Zones on H-reflex Characteristics under Support Unloading Condition. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2015. V. 41. P. 46–52. DOI: 10.7868/S0131164615020174 (in Russian).
- Kirenskaia A. V., Kozlovskaya I. B., Sirota M. G. Effect of immersion hypokinesia on the characteristics of the rhythmic activity of the motor units of the soleus muscle. *Fiziologiya cheloveka*. 1986. V. 12(4). P. 627–632 (in Russian).
- Kozlovskaya I. B. Gravity and the tonic postural motor system. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2017. V. 51. P. 5–21. DOI: 10.21687/0233–528X-2017–51–3–5–21 (in Russian).
- Kozlovskaya I. B. Opornaya afferentatsiya v kontrole tonicheskoi myshechnoi aktivnosti [Support afferentation in the control of tonic muscle activity]. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal im. I. M. Sechenova* [I. M. Sechenov Russian Journal of Physiology]. 2004. V. 90. P. 418–419 (in Russian).
- Kornilova L. N., Alekhina M. I., Temnikova V. V., Azarov K. A. Pursuit function of the eye during 7-day dry immersion without and with a support stimulator. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2004. V. 38. P. 41–48 (in Russian).
- Kremneva E. I., Saenko I. V., Chernikova L. A. et al. Specifics of Activation of Cortex by Stimulation of Support Receptors in Healthy Subjects and in Patients with Lesions of CNS. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2013. V. 39. P. 86–92. DOI: 10.7868/S0131164613050093 (in Russian).
- Levchenkova V. D., Semjonova K. A. Contemporary views of the morphological basis of infant cerebral palsy. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of Neurology and Psychiatry named after S. S. Korsakov.]. 2012. V. 112. P. 4–8 (in Russian).
- Melnik K. A., Artamonov A. A., Miller T. F., Voronov A. V. Effects of mechanic stimulation of the foot support zones

- on locomotion kinematics during 7-day dry immersion. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2006. V. 40. P. 59–65 (in Russian).
- Miller T. F., Saenko I. V., Popov D. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Effect of support deprivation and stimulation of the feet support zones on the characteristics of cross stiffness and electromyogram of resting muscles of the calf in 7-day immersion. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2010. V. 44. P. 13–17 (in Russian).
- Ogneva I. V., Shenkman B. S., Kozlovskaya I. B. Soderzhanie desmina i al'fa-aktinina-1 v kambalovidnoi myshtse cheloveka posle 7-sutochnoi "sukhoi" immersii [The content of desmin and alpha-actinin-1 in human flounder muscle after 7-day "dry" immersion]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2011. V. 436. P. 709–711 (in Russian).
- Petrova N. V., Trusov V. A., Kiselov N. P., Makiev E. A. Modern neurorehabilitation technologies in traumatic brain injury consequences. *Vestnik Soveta molodykh uchennykh i spetsialistov Chelyabinskoi oblasti* [Bulletin of the Council of Young Scientists and Specialists of the Chelyabinsk region]. 2019. V. 1. P. 43–46 (in Russian).
- Prityko A. G., Chebanenko N. V., Zykov V. P. et al. Experience of application of proprioceptive modeling of walking in children of early age with motor disorders. *Russkiy zhurnal detskoy nevrologii* [Russian Journal of Child Neurology]. 2019. V. 14(3). P. 16–27. DOI: 10.17650/2073–8803–2019–14–3–16–27 (in Russian).
- Sveshnikov A. A., Smotrova L. A., Ovchinnikov E. N. Mekhanizmy demineralizatsii kostnoi tkani [Mechanisms of bone demineralization.]. *Genii ortopedii* [The genius of orthopedics.]. 2005. № 2. P. 95–99 (in Russian).
- Saenko I. V., Kremneva E. I., Glebova O. V. et al. New Approaches in the Rehabilitation of Patients with Central Nervous System Lesions Based on the Gravitational Mechanisms. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2017. V. 43. P. 118–128. DOI: 10.7868/S0131164617050137 (in Russian).
- Serova N. J., Tishchenko M. K., Nikishov S. J. The method of pneumatic imitation of weight-bearing in children with shin fractures. *Current Pediatrics*. 2012. V. 11. P. 74–80. DOI: 10.15690/vsp.v11i4.362 (in Russian).
- Solovieva A. A., Sedova E. A., Tomilovskaya E. S., Shigueva T. A., Afonin B. V. Functional activity of the liver in immersion and effects of the countermeasures. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2014. V. 48. P. 16–23 (in Russian).
- Titarenko N. Yu., Levchenkova V. D., Semenova K. A., Batysheva T. T., Dotsenko V. I. Current non-surgical approaches to correct motion disorders in cerebral palsy children: the literature review. 2015. *Detskaya i podrostkovaya reabilitatsiya* [Child. Adolesc. Rehabil.]. V. 2. P. 71–79 (in Russian).
- Tolstaya S. I., Ivanova G. E., Durov O. V. et al. Rehabilitation of spinal patients with diseases and injury of the cervical spine in the early and late postoperative period (analysis of russian and foreign recommendations). *Journal of Clinical Practice*. 2023. V. 14. P. 54–65. DOI: 10.17816/clinpract472096 (in Russian).
- Tomilovskaya E. S., Shigueva T. A., Zakirova A. Z. et al. Mechanical Stimulation of Soles' Support Zones: Non-Invasive Method of Activation of Generators of Stepping Movements in Man. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2013. V. 39. P. 34. DOI: 10.7868/S0131164613050159 (in Russian).
- Tomilovskaya E. S., Shenkman B. S., Kozlovskaya I. B. Gipogravitatsionnyi dvigatel'nyi sindrom: priroda i mekhanizmy razvitiya [Hypogravitational motor syndrome: the nature and mechanisms of development]. *Novye podkhody k izucheniyu problem fiziologii ekstremal'nykh sostoyanii* [New approaches to the study of the problems of the physiology of extreme conditions]. 2021. P. 77 (in Russian).
- Fomina E. V., Lysova N. Y., Savinkina A. O. et al. Role of Support Receptor Stimulation in Locomotor Training for the Prevention of Hypogravitational Disorders. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2021. V. 47(3). P. 88–97. DOI: 10.31857/S013116462103005X (in Russian).
- Khoroshun A. A., Piradov M. A., Chernikova L. A. New technologies in rehabilitation: plantar imitator of bearing load for patients with Guillain-Barre syndrome. *Annaly klinicheskoi i eksperimental'noi nevrologii* [Annals of Clinical and Experimental Neurology]. 2012. V. 6(1). P. 20–24 (in Russian).
- Chernikova L. A., Kremneva E. I., Chervyakov A. V. et al. New Approaches in the Study of Neuroplasticity Process in Patients with Central Nervous System Lesion. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2013. V. 39. P. 54–60. DOI: 10.7868/S0131164613030053 (in Russian).
- Shapkova E. Y., Emelyannikov D. V., Larionova Y. E. Sensorimotor and Locomotor Adjustments in the Chronic Post-Traumatic Spinal Cord Damage in Human Adults as Evidence of Activity-Dependent Neuroplasticity. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2021. V. 47. P. 5–16. DOI: 10.31857/S0131164621040147 (in Russian).
- Shapkova E. Y., Shtyrina E. V., Saenko I. V., Kozlovskaya I. B. Elektrostimulyatsiya lokomotornoi zony spinnogo mozga i pnevmostimulyatsiya opornoj chasti stopy dlya vosstanovleniya lokomotornykh sposobnostei pri nizhnikh paraplegiyakh [Electrical stimulation of the locomotor zone of the spinal cord and pneumostimulation of the supporting part of the foot to restore locomotor abilities in lower paraplegia.]. "Polenovskie chteniya": *materialy XII nauchno-prakticheskoi konferentsii* ["Polenov readings": materials of the XII scientific and practical conference]. 2013. P. 418 (in Russian).

- Shvarkov S. B., Titova E. U., Mizieva Z. M., Matveeva O. S., Bobrovskaya A. N. Application of integrated proprioceptive correction in motor recovery in patients with stroke. *Klinicheskaya praktika* [Clinical practice]. 2011. V. 2. P. 3–8 (in Russian).
- Shenkman B. S., Vinogradova O. L., Mazin M. G. et al. Fiziologicheskaya stoimost' fizicheskoy nagruzki i ob'em mitokhondrij rabochikh myshc u lyudej v usloviyakh dlitel'noj gipokinezii. Effekti rezistivnykh lokal'nykh nagruzok. [The physiological value of physical activity and the volume of mitochondria of working muscles in people with prolonged hypokinesia. Effects of resistive local loads]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2003. V. 29. P. 75–80 (in Russian).
- Shenkman B. S., Grigoriev A. I., Kozlovskaya I. B. Gravity Mechanisms in Tonic Motor System. Neurophysiological and Muscle Aspects. *Fiziologiya Cheloveka* [Human Physiology]. 2017. V. 43. P. 104–117. DOI: 10.7868/S0131164617050149 (in Russian).
- Shenkman B. S., Mirzoev T. M., Kozlovskaya I. B. Tonic activity and gravitational control of the postural muscle. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2020. V. 54. P. 58–72 (in Russian).
- Shigueva T. A., Zakirova A. Z., Tomilovskaya E. S., Kozlovskaya I. B. Effect of support deprivation on the sequence of motor units recruiting. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2013. V. 47. P. 50–53 (in Russian).
- Shklovsky B. M., Fukalov Yu. A., Mamicheva E. D. *Otchet o primeneniі podoshvennogo imitatora opornoі nagruzki (model' "KORVIT")*. *Tsentr patologii i neiroreabilitatsii DZ g. Moskvy*. [Report on the use of a plantar support load simulator (KORVIT model). Center of Speech Pathology and Neurorehabilitation]. 2022. URL: <https://korvit.org/wp-content/uploads/2022/06/otzyv-czprin.pdf> (in Russian).
- Ernandes Korvo R., Kozlovskaya I. B., Kreidich Yu. V. et al. *Eksperiment "Support". Issledovanie vliyaniі 7-sutochnogo kosmicheskogo poleta na strukturu i funktsiyu opornogo apparata cheloveka* [The "Support" study. Study of the effects of 7-day space flight on the structure and function of the human support apparatus]. Havana; Moscow, 1981. (in Russian).
- Amirova L. E., Navasiolava N. M., Bareille M. P. et al. Effects of plantar stimulation on cardiovascular response to orthostatism. *European journal of applied physiology*. 2016. V. 116. P. 2257–2266.
- Bastani A., Hadian M. R., Talebian S., Bagheri H., Olyaei G. R. Modulation of the ipsilateral and contralateral H reflexes following ipsilateral mechanical pressure of the foot in normal subjects. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*. 2010. V. 50. P. 251–256.
- Brognara L., Cauli O. Mechanical plantar foot stimulation in Parkinson's disease: a scoping review. *Diseases*. 2020. V. 8(2). P. 12. DOI: 10.3390/diseases8020012
- De-Doncker L., Picquet F., Falempin M. Effects of cutaneous receptor stimulation on muscular atrophy developed in hindlimb unloading condition. *Journal of Applied Physiology*. 2000. V. 89(6). P. 2344–2351. DOI: 10.1152/jappl.2000.89.6.2344
- De Witt J. K., Ploutz-Snyder L. L. Ground reaction forces during treadmill running in microgravity. *Journal of biomechanics*. 2014. V. 47. P. 2339–2347.
- Fomina E. V., Savinkina A. O., Yarmanova E. N. Ground reaction force values in cosmonauts during locomotor exercises on board the International space station. *Hum. Physiol*. 2017. V. 43. P. 542–548. DOI:10.1134/S0362119717050048
- Gerasimenko Y., Gad P., Sayenko D. et al. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. *Journal of neurophysiology*. 2016. V. 116. P. 98–105. DOI:10.1152/jn.00146.2016
- Gurfinkel V. S., Levik Yu. S., Kazennikov O. V., Selionov V. A. Locomotor-like movements evoked by leg muscle vibration in humans. *European Journal of Neuroscience*. 1998. V. 10. P. 1608–1612. DOI: 10.1046/j.1460-9568.1998.00179.x
- Khusnutdinova D., Netebe A., Kozlovskaya I. Mechanical stimulation of the soles support zones as a countermeasure of the contractile properties decline under microgravity conditions. *J. Gravit. Physiol*. 2004. V. 11. P. 141–2.
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Miller T. F. Erratum to: New approaches to counter measures of the negative effects of micro-gravity in long-term space flights: [Acta Astronautica 59 (2006) 13–19]. *Acta Astronautica*. 2007a. V. 60. P. 783–789. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.09.038
- Kozlovskaya I. B., Sayenko I. V., Sayenko D. G. et al. Role of support afferentation in control of the tonic muscle activity. *Acta Astronautica*. 2007b. V. 60. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.08.010
- Kyparos A., Feedback D. L., Layne C. S., Martinez D. A., Clarke M. S. Mechanical stimulation of the plantar foot surface attenuates soleus muscle atrophy induced by hindlimb unloading in rats. *J. Appl. Physiol*. 2005. V. 99. P. 739–746. DOI: 10.1152/jappphysiol.00771.2004
- Labriffe M., Annweiler C., Amirova L. E. et al. Brain activity during mental imagery of gait versus gait-like plantar stimulation: a novel combined functional MRI paradigm to better understand cerebral gait control. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017. V. 11. P. 106. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00106
- Layne C. S., Forth K. E. Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation. *Aviation, space, and environmental medicine*. 2008. V. 79. P. 787–794. DOI: 10.3357/ASEM.2293.2008

- Leelachutidej O., Srisawasdi G., Chadchavalpanichaya N., Sukthomya S. Influence of Textured Surface Insoles on Postural Control in Older Adults. *Journal of The Department of Medical Services*. 2023. V. 48. P. 45.
- Litvinova K. S., Vikhlyantsev I. M., Kozlovskaya I. B., Podlubnaya Z. A., Shenkman B. S. Effects of artificial support stimulation on fiber and molecular characteristics of soleus muscle in men exposed to 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 131–2.
- Maurer C., Mergner T., Bolha B., Hlavacka F. Human balance control during cutaneous stimulation of the plantar soles. *Neuroscience Letters*. 2001. V. 302. P. 45–48. DOI: 10.1016/S0304–3940(01)01655-X
- Miller T., Ivanov O., Galanov D., Guekht A., Sayenko I. Mechanical stimulation of the foot support zones as a way to maintain activity of the tonic muscular system during functional support deprivation. *J. Gravit. Physiol.* 2005. V. 12. P. 149–150.
- Miller T. F., Saenko I. V., Popov D. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Effect of mechanical stimulation of the support zones of soles on the muscle stiffness in 7-day dry immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 135–136.
- Moore S. T., Dilda V., Morris T. R. et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency. *Scientific reports*. 2019. V. 9. P. 2677. DOI: 10.1038/s41598–019–39058–9
- Motanova E., Bekreueva M., Rukavishnikov I. et al. Application of space technologies aimed at proprioceptive correction in terrestrial medicine in Russia. *Frontiers in Physiology*. 2022. V. 13. P. 921862. DOI: 10.3389/fphys.2022.921862
- Moukhina A., Shenkman B., Blottner D. et al. Effects of support stimulation on human soleus fiber characteristics during exposure to “dry” immersion. *J. Gravit. Physiol.* 2004. V. 11. P. 137–138.
- Nemirovskaya T. L., Shenkman B. S. Effect of support stimulation on unloaded soleus in rat. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. V. 87. P. 120–126. DOI: 10.1007/s00421–002–0603–7
- Nordin N., Xie S. Q., Wünsche B. Assessment of Movement Quality in Robot-Assisted Upper Limb Rehabilitation after Stroke: A Review. *J. NeuroEngineering Rehabilitation*. 2014. V. 11. P. 1–23. DOI: 10.1186/1743–0003–11–137
- Orlov O. I., Belakovskiy M. S., Kussmaul A. R., Tomilovskaya E. S. Using the Possibilities of Russian Space Medicine for Terrestrial Healthcare. *Frontiers in physiology*. 2022. V. 13. P. 921487. DOI: 10.3389/fphys.2022.921487
- Pandiarajan M., Hargens A. R. Ground-based analogs for human spaceflight. *Frontiers in Physiology*. 2020. V. 11. P. 716. DOI: 10.3389/fphys.2020.00716
- Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A. et al. Alterations of functional brain connectivity after long-duration spaceflight as revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. P. 761. DOI: 10.3389/fphys.2019.00761
- Popov D. V., Saenko I. V., Vinogradova O. L., Kozlovskaya I. B. Mechanical stimulation of foot support zones for preventing unfavourable effects of gravitational unloading. *J. Gravit. Physiol.* 2003. V. 10(1). P. 59–60. Qiu F., Cole M. H., Davids K. W., Hennig E. M., Silburn P. A., Netscher H., Kerr G. K. Effects of textured insoles on balance in people with Parkinson's disease. *PLoS One*. 2013. V. 8. P. e83309. DOI: 10.1371/journal.pone.0083309
- Ratushnyy A. Y., Buravkova L. B. Microgravity Effects and Aging Physiology: Similar Changes or Common Mechanisms? *Biochemistry (Moscow)*. 2023. V. 88. P. 1763–1777.
- Saveko A., Bekreueva M., Ponomarev I. et al. Impact of different ground-based microgravity models on human sensorimotor system. *Frontiers in Physiology*. 2023. V. 14. P. 1085545. DOI: 10.3389/fphys.2023.1085545
- Saveko A., Brykov V., Kitov V., Shpakov A., Tomilovskaya E. Adaptation in gait to lunar and martian gravity unloading during long-term isolation in the ground-based space station model. *Frontiers in human neuroscience*. 2022. V. 15. P. 742664. DOI: 10.3389/fnhum.2021.742664
- Sayenko I. V., Vinogradova O. L., Sayenko D. G. et al. Simulated support as a countermeasure against motor disorders during dry immersion. In: Proc. International Congress “Motor control”. Sofia. 2003.
- Shapkova E., Emeljannikov D., Shtyrina E., Mushkin A. Neurological Complications of Multisegmental Spine Reconstruction in Children: Post-Op Spinal Cord Electrical Stimulation (SCES) and Training Decrease Motor Deficit. *Global Spine Journal*. 2016. V. 6. P. s-0036–1582657. DOI: 10.1055/s-0036–1582657
- Sharlo K., Lvova I., Turtikova O. et al. Plantar stimulation prevents the decrease in fatigue resistance in rat soleus muscle under one week of hindlimb suspension. *Archives of biochemistry and biophysics*. 2022. V. 718. P. 109150. DOI: 10.1016/j.abb.2022.109150
- Shenkman B. S., Litvinova K. S., Nemirovskaya T. L. et al. Afferent and peripheral control of muscle fiber properties during gravitational unloading. *J. Gravit. Physiol.* 2004a. V. 11. P. 111–114.
- Vinogradova O. L., Popov D. V., Saenko I. V., Kozlovskaya I. B. Muscle transverse stiffness and venous compliance under conditions of simulated supportlessness. *Life in Space for Life on Earth*. 2002. V. 501. P. 65–67.
- Shenkman B. S., Podlubnaya Z. A., Vihlyantsev I. M. et al. Contractile characteristics and sarcomeric cytoskeletal proteins of human soleus fibers in muscle unloading: role of mechanical stimulation from the support surface. *Biophysics*. 2004b. V. 49. P. 881–890.
- Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D., Rukavishnikov I., Kozlovskaya I. Dry immersion as a ground-based

- model of microgravity physiological effects. *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. P. 284. DOI: 10.3389/fphys.2019.00284
- Tyganov S. A., Mochalova E. P., Melnikov I. Y., Vikhlyantsev I. M., Ulanova A. D., Sharlo K. A., Mirzoev T. M., Shenkman B. S. NOS-dependent effects of plantar mechanical stimulation on mechanical characteristics and cytoskeletal proteins in rat soleus muscle during hind-limb suspension. *The FASEB Journal*. 2021. V. 35(10). P. e21905. DOI: 10.1096/fj.202100783R.
- Widrick J. J., Knuth S. T., Norenberg K. M. et al. Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres. *The Journal of physiology*. 1999. V. 516. P. 915–930. DOI: 10.1111/j.1469-7793.1999.0915u.x
- Wikstrom E. A., Song K., Lea A., Brown N. Comparative effectiveness of plantar-massage techniques on postural control in those with chronic ankle instability. *Journal of the Athletic Training*. 2017. V. 52. P. 629–635. DOI: 10.4085/1062-6050-52.4.02
- Yumin T. E., Simsek T. T., Sertel M., Ankarali H., Yumin M. The effect of foot plantar massage on balance and functional reach in patients with type II diabetes. *Physiotherapy Theory and Practice*. 2017. V. 33. P. 115–123. DOI: 10.1080/09593985.2016.1271849.