Дата публикации: 01.03.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_7
УДК 612

Publication date: 01.03.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_7
UDC 612

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА ПРИ АНТИОРТОСТАТИЧЕСКОМ ВЫВЕШИВАНИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МЫШЦ ГОЛЕНИ У САМЦОВ КРЫС СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА

Н.Г. Искаков[1], М.Э. Балтин[1], О.В. Герасимов[1,2], А.А. Еремеев[2], А.О. Федянин[1,2]
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма», г. Казань, Россия
[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Россия

Аннотация. В исследовании изучено влияние чрескожной магнитной стимуляции спинного мозга на функциональное состояние нейромоторного аппарата мышц голени крыс в условиях моделирования длительной гравитационной разгрузки. Проведена электромиографическая оценка порогов возникновения, амплитуды, моторных (М) и рефлекторных (Н) ответов, а также анализ надежности нервно-мышечной передачи посредством проведения декремент-теста. Было установлено, что магнитная стимуляция способствует небольшой возбудимости спинальных двигательных центров и частичной стабилизации функционального состояния периферических и центральных структур нейромоторного аппарата в условиях 35-суточной разгрузки. Выявлено, что активация низкопороговых мотонейронов и модуляция спинальных структур стимулируют процессы нейропластичности, улучшая проведение возбуждения. Обнаруженные эффекты вероятно связаны с активацией сенсорных афферентов и внутриспинальных нейронных связей. Результаты исследования подтверждают терапевтический потенциал магнитной стимуляции спинного мозга для применения в нейрореабилитации, включая восстановление двигательных функций после длительного ограничения локомоторной активности, в том числе в условиях космических полетов.
Ключевые слова: антиортостатическое вывешивание, магнитная стимуляция, камбаловидная мышца, икроножная мышца, электромиография.

THE EFFECT OF MAGNETIC STIMULATION OF THE SPINAL CORD DURING ANTI-ORTHOSTATIC HANGING ON THE FUNCTIONAL CONDITION OF THE CALF MUSCLES IN MIDDLE-AGED MALE RATS

N.G. Iskakov[1], M.E. Baltin[1], O.V. Gerasimov[1,2], A.A. Eremeev[2], A.O. Fedianin[1,2]
[1]Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, Russia
[2]Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract. The study explores the effect of transcutaneous magnetic stimulation of the spinal cord on the functional state of the neuromotor system of the rat calf muscles under conditions of long-term hindlimb unloading. Electromyographic assessment of thresholds of occurrence, amplitude, motor (M) and reflex (H) responses was performed, as well as an analysis of the reliability of neuromuscular transmission using a decrement test. It was found that magnetic stimulation promotes slight excitability of spinal motor centers and partial stabilization of the functional state of peripheral and central structures of the neuromotor apparatus under conditions of 35-day unloading. It was found that activation of low-threshold motor neurons and modulation of spinal structures stimulate neuroplasticity processes, improving excitation conduction. The observed effects are probably associated with the activation of sensory afferents and intraspinal neural connections. The results of the study confirm the therapeutic potential of magnetic stimulation of the spinal cord for use in neurorehabilitation, including the restoration of motor functions after prolonged limitation of locomotor activity, including in space flight conditions.
Keywords: hindlimb unloading, magnetic stimulation, soleus muscle, gastrocnemius muscle, electromyography.

Введение. Растущая значимость освоения космоса и околокосмического пространства, частое сопровождаемое ограничениями локомоторной активности возникновение нарушений ставят перед исследователями задачу изучения процессов адаптивно-компенсаторной реорганизации двигательных функций организма.

Такой подход направлен как на расширение знаний о нейропластичности, так и на создание инновационных реабилитационных методов для восстановления моторики. Одним из таких методов, на наш взгляд, может являться неинвазивная магнитная стимуляция спинного мозга. Магнитная стимуляция (МС) имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами различных нейромодуляционных воздействий. В частности, одним из таких свойств является глубокое проникновение магнитного стимула в ткани, при этом не активируются кожные рецепторы и, как следствие, отсутствуют неприятные болевые ощущения [1], что определяет широкое применение МС [2]. МС основана на способности высокоинтенсивного импульсного магнитного поля, способна вызывать в тканях тела человека за счет деполяризации мембраны нервной клетки собственный электрический потенциал нейронов, и распространять его по нервным проводникам [3]. Особенностью распространения импульса при МС является то, что несмотря на уменьшение интенсивности индуцированного тока с расстоянием на величину этой интенсивности не оказывают влияния окружающие ткани. Магнитное поле проходит все части тела без существенного затухания, поэтому структуры с высоким электрическим сопротивлением (например, кости черепа) не меняют характеристик поля, а следовательно, и величины индуцированного тока в тканях (мозге). В последнее время появляется все больше данных о положительном влиянии МС спинного мозга на активацию процессов нейрональной пластичности [4-7]. Было показано, что повторяющаяся транскраниальная магнитная стимуляция обладает терапевтическим потенциалом при некоторых неврологических расстройствах. Магнитная терапия улучшала состояния опорно-двигательного аппарата и нервно-мышечной системы у спортсменов, что было подтверждено результатами тестов на скорость и силу [8]. Таким образом, целью нашего исследования стало оценить периферические и центральные механизмы функциональных изменений нейро-моторного аппарата мышц голени крысы в условиях длительного антиортостатического вывешивания комбинируемого с чрескожной магнитной стимуляцией спинного мозга.

Методы и организация исследования. Исследование проводили на лабораторных половозрелых самцах крыс среднего возраста массой 180-220 г. при соблюдении правил биоэтики (протокол ЛЭК Поволжского ГУФКСиТ №2 от 26.05.2023 г.). Выведение животных из эксперимента осуществлялось в соответствии с принципами Базельской декларации, требованиями Директивы Европейского парламента и Совета от 22 сентября 2010 г. по защите животных, используемых для научных целей, и инструкциях ARRIVE [9, 10]. Для анестезии животных использовали комбинированный внутримышечный наркоз смесью золетила («Zoletil 50», Франция) 0,5 мг/кг и ксилавета (XylaVET, Венгрия) 0,05 мл/кг.

Моделирование гравитационной разгрузки осуществляли общепринятым методом антиортостатического вывешивания (АОВ) крысы за хвост по модели E.R. Morey-Holton в модификации В.Е. Новикова и Е. А. Ильина [11, 12] в течение 35 суток.

Для магнитной стимуляции спинного мозга использовался магнитный стимулятор «Нейро-МВП-4» (Нейрософт, Россия). Животные в период антиортостатического вывешивания в течение 35 суток ежедневно подвергались магнитной стимуляции спинного мозга длительностью 10 мин/через 10 мин в течение 1,5 часов; интенсивность стимулов – пороговая для сокращения мышцы; частота – 3 Гц.

Для оценки функционального состояния нейромоторного аппарата камбаловидной мышцы (КМ) и икроножной мышцы (ИМ) проводили электромиографическое тестирование (ЭМГ). Регистрировали моторный (М) и рефлекторный (Н) ответы. Определяли порог возникновения, максимальную амплитуду, латентность и длительность вызванных потенциалов.

Проводили декремент-тест М-ответа, характеризующий функциональное состояние синаптической передачи. Для этого седалищный нерв раздражали супрамаксимальными ритмическими стимулами

частотой 50 Гц, сравнивали амплитуду 1-го и 200-го моторных потенциалов [13, 14].

Материалы исследования статистически обработаны с использованием методов параметрического и непараметрического анализа. Накопление, систематизация исходной информации и визуализация полученных результатов осуществлялись в электронных таблицах Microsoft Office Excel 2010. Статистический анализ проводился с использованием программы STATISTICA 13.3 (разработчик – StatSoft.Inc). Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению, для этого использовался критерий Шапиро-Уилка. Достоверность результатов определяли в зависимости от нормальности распределения t-критерием Стьюдента и U-критерием Манна-Уитни. Уровень значимости принимали $p<0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. *Параметры Н-ответа КМ.* Порог рефлекторного ответа КМ (рис. 1) в группе АОВ был снижен до 81±8% ($p<0,05$), а в группе АОВ+МС – 73±16% ($p<0,05$). Амплитуда Н-ответа КМ в группе АОВ увеличивалась до 130±15% ($p<0,05$), в группе АОВ+МС – 120±10% ($p<0,05$).

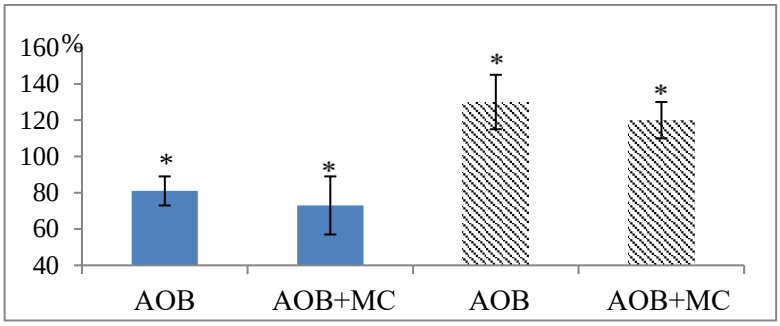


Рис. 1. Параметры рефлекторного ответа камбаловидной мышцы крысы

Примечание: синим цветом обозначены пороговые значения, серым цветом обозначены значения максимальной амплитуды, выраженные в процентах по отношению к контрольным данным, принятым за 100%. По оси абсцисс представлены названия исследуемых групп. * – достоверность, $p<0,05$. АОВ – антиортостатическое вывешивание; МС – магнитная стимуляция.

Таким образом, при гравитационной разгрузке (35 сут) в экспериментальных группах регистрировали увеличение рефлекторной возбудимости спинального двигательного центра КМ.

Параметры М-ответа КМ. Порог моторного ответа КМ (рис. 2) в группе АОВ составил 75±13% ($p<0,05$), порог М-ответа в группе АОВ+МС составил 92±10% ($p>0,05$). В группе АОВ амплитуда М-ответа составила 73±11% ($p<0,05$), в группе АОВ+МС – 70±15% ($p<0,05$).

Величина декремента М-ответа (рис. 3) КМ значительно отличалась от величины, соответствующей нормальной надежности нервно-мышечной передачи. В группе АОВ декремент достигал 50±11%, в группе АОВ+МС – 46±15% ($p<0,05$).

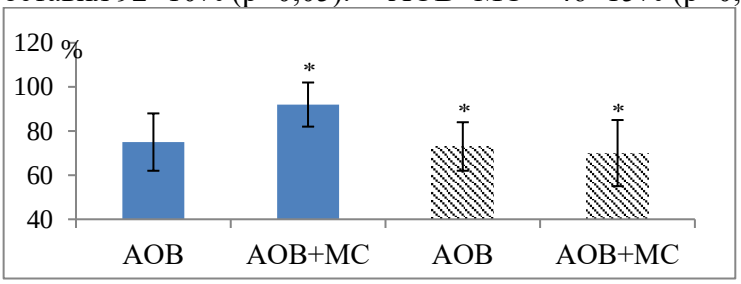


Рис. 2. Параметры моторного ответа камбаловидной мышцы крысы

Примечание: синим цветом обозначены пороговые значения, серым цветом обозначены значения максимальной амплитуды, выраженные в процентах по отношению к контрольным данным, принятым за 100%. По оси абсцисс представлены названия исследуемых групп. * – достоверность, $p<0,05$. АОВ – антиортостатическое вывешивание; МС – магнитная стимуляция.

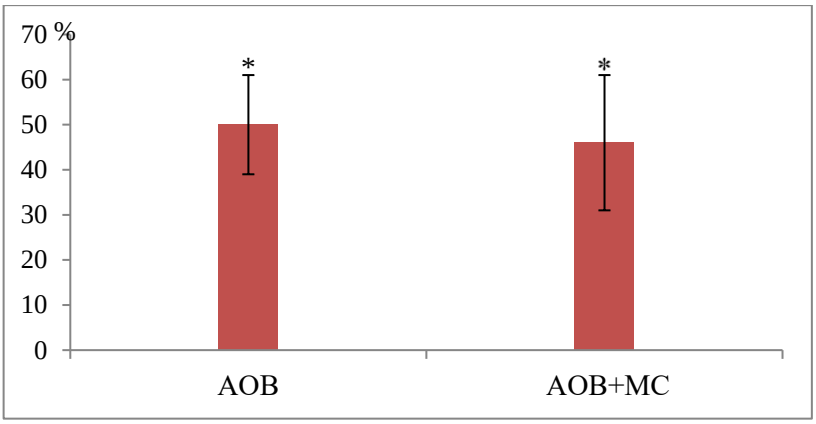


Рис. 3. Декремент тест моторного ответа камбаловидной мышцы крысы

Примечание: красным цветом обозначены значения максимальной амплитуды, выраженные в процентах по отношению к контрольным данным, принятым за 100%. По оси абсцисс представлены названия исследуемых групп. * – достоверность, $p<0,05$. АОВ – антиортостатическое вывешивание; МС – магнитная стимуляция.

Таким образом, стимуляция спинного мозга при длительной гравитационной разгрузке предотвращала изменения порога М-ответа КМ, но не исключала уменьшения амплитуды и снижение надежности нервно-мышечной передачи возбуждения.

Параметры Н-ответа ИМ. Порог рефлекторного ответа ИМ (рис. 4) был снижен во всех экспериментальных группах. В группе АОВ порог Н-ответа ИМ снижался до 47±10% ($p<0,05$), в группе АОВ+МС – 67±23% ($p<0,05$). Амплитуда Н-ответа ИМ в группе АОВ увеличивалась до 155±15% ($p<0,05$), в группе АОВ+МС – 138±21% ($p<0,05$).

Параметры М-ответа ИМ. Порог моторного ответа ИМ (рис. 5) в группе АОВ уменьшался и составил 72±13% ($p<0,05$), в группе АОВ+МС – 75±13% ($p<0,05$). Амплитуда М-ответа увеличивалась до 131±11% ($p<0,05$) в группе АОВ, в группе АОВ+МС статистически значимых изменений не выявлено.

Декремент в группе АОВ составил 28±5% ($p<0,05$), в группе АОВ+МС – 33±17% ($p<0,05$) (рис. 6).

.

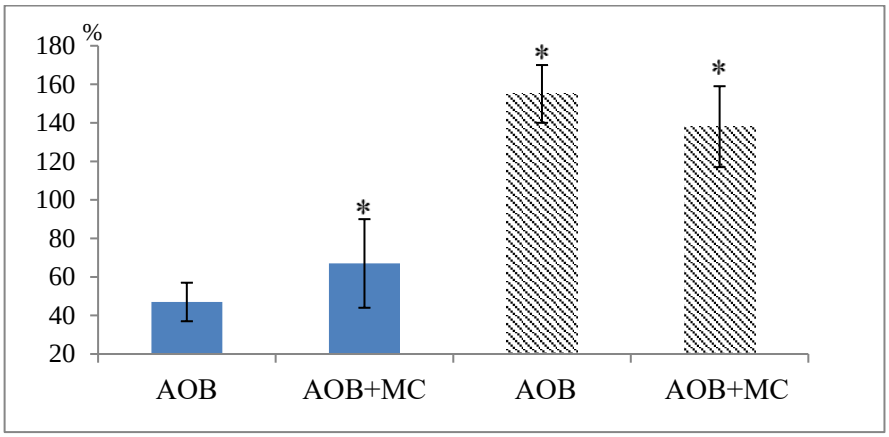


Рис. 4. Параметры рефлекторного ответа икроножной мышцы крысы

Примечание: синим цветом обозначены пороговые значения, серым цветом обозначены значения максимальной амплитуды, выраженные в процентах по отношению к контрольным данным, принятым за 100%. По оси абсцисс представлены названия исследуемых групп. * – достоверность, $p<0,05$. АОВ – антиортостатическое вывешивание; МС – магнитная стимуляция.

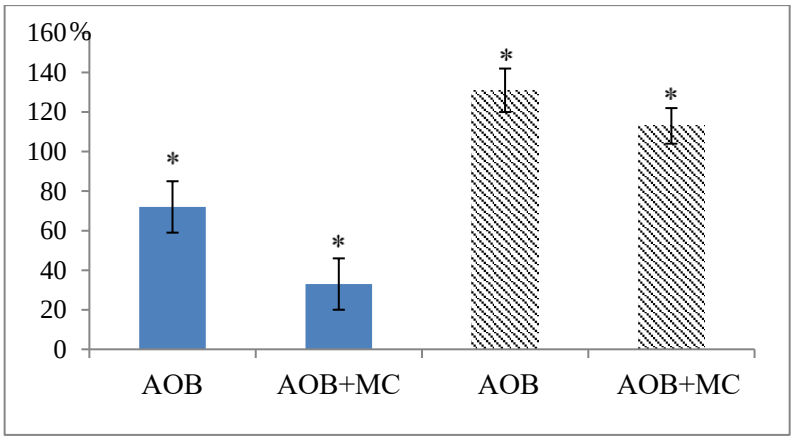


Рис. 5. Параметры моторного ответа икроножной мышцы крысы

Примечание: синим цветом обозначены пороговые значения, серым цветом обозначены значения максимальной амплитуды, выраженные в процентах по отношению к контрольным данным, принятым за 100%. По оси абсцисс представлены названия исследуемых групп. * – достоверность, p<0,05. АОВ – антиортостатическое вывешивание; МС – магнитная стимуляция.

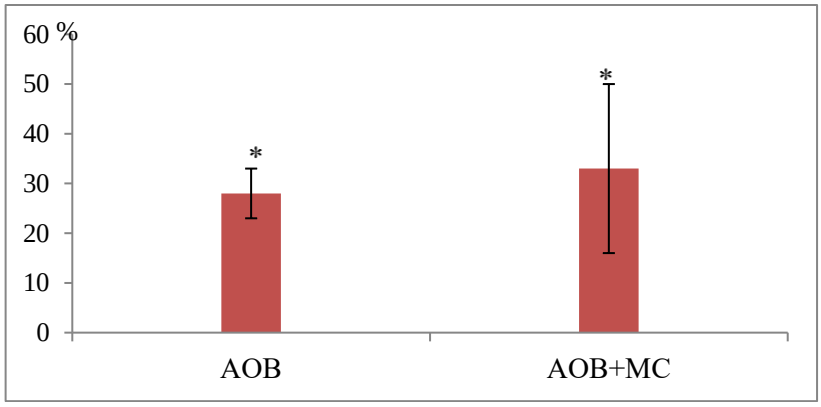


Рис. 6. Декремент тест моторного ответа икроножной мышцы крысы

Примечание: красным цветом обозначены значения максимальной амплитуды, выраженные в процентах по отношению к контрольным данным, принятым за 100%. По оси абсцисс представлены названия исследуемых групп. * – достоверность, p<0,05. АОВ – антиортостатическое вывешивание; МС – магнитная стимуляция.

Таким образом, в результате длительной гравитационной разгрузки в экспериментальной группе периферические звенья нейромоторного аппарата ИМ демонстрировали облегчение активации.

Полученные в нашем исследовании результаты продемонстрировали, что чрескожная магнитная стимуляция спинного мозга в условиях моделирования 35-суточного антиортостатического вывешивания приводит к возбудимости спинальных двигательных центров икроножной и камбаловидной мышц крысы. Внутриспинальное проведение возбуждения облегчается. Несмотря на то, что неинвазивная магнитная стимуляция спинного мозга используется недавно и существует мало доказательств потенциального положительного эффекта, результаты исследований весьма многообещающие, например, показано, что магнитная стимуляция спинного мозга активирует нейроны, ответственные за локомоторную активность [15]. В своем же исследовании мы продемонстрировали, что активация спинальных структур в условиях АОВ, в целом приводит к стабилизации функционального состояния мышц конечности и ее двигательных центров. Мы предполагаем, что изменение состояния низкопороговых малых мотонейронов приводит к наблюдаемому снижению возбудимости центров. Возможный механизм

снижения возбудимости – это непрямая модуляция спинного мозга посредством стимуляции сенсорных корешков с участием афферентов Ia [16], или антидромно посредством стимуляции двигательных корешков. В последнем случае это будет косвенно подавлять гипервозбудимые мотонейроны. Так же в литературе описано, что чрескожная магнитная стимуляция спинного мозга способствует выполнению специфических двигательных задач и эффективной обработке соматосенсорной информации за счет активации нейронной сети [17] и обеспечивает нервно-мышечную активацию, которая является важной для сохранения функциональности мышцы.

Увеличение рефлекторной активности представляется процессом, тесно связанным и/или необходимым для восстановления двигательной активности. В работах S. Harkema в 2011 году [18] и C.A. Angeli в 2014 году [19] отмечается важная роль активизации спинальных нейронных сетей в вероятности/эффективности восстановления произвольных движений после повреждения спинного мозга, и как следствие нарушения двигательной активности. H.J. Lee с соавторами в 2009 году [20] показали, что усиление рефлекторных реакций коррелировало с восстановлением локомоций после травмы спинного мозга у мышей. Повышение же активности нейронов спинного мозга способно усиливать процессы спонтанной регенерации [21, 22]. Двигательная активность, демонстрируемая человеком или животными в период после завершения экспозиции в условиях реальной или моделируемой невесомости, должна быть обусловлена действием компенсаторных механизмов, интенсифицирующих функциональные возможности двигательного аппарата [23].

Известно, что стимуляция спинного мозга модулирует сегментарную активность и позволяет использовать резервные возможности нейрональных рефлекторных цепей спинного мозга. Эффекты спинномозговой стимуляции лежат в основе способности межнейрональной сети спинного мозга интегрировать и эффективно обрабатывать диапазон соматосенсорных входных данных, необходимых для генерации соответствующей двигательной задачи [24]. Кроме того, стимуляция может активировать спинальные афференты, обеспечивая афферентную сигнализацию, приток которой ограничен в условиях мышечной разгрузки. Также, стимуляция обеспечивает нервно-мышечную активацию, которая является критически важной в модуляции нормального морфофункционального состояния мышцы [25].

Заключение. Таким образом, на основе проведенного исследования можно заключить, что чрескожная магнитная стимуляция спинного мозга демонстрирует терапевтический потенциал в условиях длительной гравитационной разгрузки. Данный метод способствует активации нейропластических процессов, улучшению функционального состояния нейромоторного аппарата и частичной стабилизации работы центральных и периферических структур. Результаты исследования подтвердили эффективность метода для модуляции рефлекторной и двигательной активности, что может быть полезным в разработке новых терапевтических протоколов и подходов для нейрореабилитации как для космонавтов, так и для пациентов с ограничением локомоторной активности. Полученные данные создают основу для дальнейших исследований и внедрения магнитной стимуляции в практику восстановления двигательных функций.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту №23-25-10065.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study was funded by the grant from the Russian Science Foundation and the Tatarstan Academy of Sciences under the project No. 23-25-10065.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modulatory effect of repetitive peripheral magnetic stimulation on skeletal muscle tone in healthy subjects: stabilization of the elbow joint / A.A. Struppler, P.F. Havel, B.C. Angerer, P. Havel // Experimental Brain Research. – 2004. – Vol. 18. – № 1. – P. 59–66.
2. Jalinous, R.A. Technical and practical aspects of magnetic nerve stimulation / R.A. Jalinous // Journal of Clinical Neurophysiology. – 1991. – Vol. 8. – № 1. – P. 10–25.
3. Комлев, И.О. Транскраниальная магнитная стимуляция: современное состояние и перспективы использования в спорте / И.О.Комлев, А.С. Кисленко // Актуальные вопросы физической культуры и спорта. – 2016. – Т. 18. – С. 146–152.
4. Edgerton, V.R. A new age for rehabilitation / V.R. Edgerton, R.R. Roy // European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine. – 2012. – Vol. 48. – № 1. – P. 99–109.
5. Dietz, V. Restoration of sensorimotor functions after spinal cord injury / V. Dietz, K. Fouad // Brain. – 2014. – Vol. 137. – P. 654–667.
6. Meng, Z.Y. Low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation improves motor dysfunction after cerebral infarction / Z.Y. Meng, W.Q. Song // Neural Regeneration Research. – 2017. – Vol. 12. – № 4. – P. 610–613.
7. Transcutaneous Electrical Spinal Stimulation Promotes Long-Term Recovery of Upper Extremity Function in Chronic Tetraplegia / F. Inanici, S. Samejima, P. Gad [et al] // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2018. – Vol. 26. – № 6. – P. 1272–1278.
8. Trans-cranial electric stimulation, endomassage and magnetic therapy to facilitate post-injury rehabilitation in elite sports / Yu.V. Koryagina, G.N. Ter-Akopov, S.V. Nopin [et al] // Theory and Practice of Physical Culture. – 2019. – № 1. – P. 20–22.
9. Improving bioscience research reporting: The ARRIVE guidelines for reporting animal research / C. Kilkenny, W.J. Browne, I.C. Cuthill [et al] // PLoS Biology. – 2010. – Vol. 8. – № 6. – P. e1000412. DOI: 10.1371/journal.pbio.1000412.
10.Directive 2010/63/UE on the protection of animals used for scientific purposes // Official Journal of the European Union.– 2010. – Vol.53. – P.33–79.
11.A new rat model simulating some aspects of space flight / E.R. Morey, E.E. Sabelman, R.T. Turner, D.J. Baylink // Physiologist. – 1979. – Vol. 22. – P. 523–524.
12.Novikov, V.E. Age-related reactions of rat bones to their unloading / V.E. Novikov, E.A. Ilyin // Aviation, Space, and Environmental Medicine. – 1981. – Vol. 52. – P. 551–553.
13.Электромиография в диагностике нервно-мышечных заболеваний / Б.М. Гехт, Л.Ф. Касаткина, М.И. Самойлов, А.Г. Санадзе. – Таганрог: Издательство ТРТУ, 1997. – 370 с.
14.Masseteric repetitive nerve stimulation in the diagnosis of myasthenia gravis / G. Pavesi, L. Cattaneo, S. Tinchelli, D. Mancia // Clinical Neurophysiology. – 2001. – Vol. 112. – P. 1064–1069.
15.Исследование рефлекторных ответов мышц задних конечностей наркотизированных крыс на электромагнитную стимуляцию спинного мозга / Н.А. Щербакова, И.Н. Богачева, Н.М. Зеленкова [и др.] // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. – 2012. – № 26. – С. 15–22.
16.Knikou, M. Neurophysiological characteristics of human leg muscle action potentials evoked by transcutaneous magnetic stimulation of the spine / M. Knikou // Bioelectromagnetics. – 2013. – Vol. 34. – P. 200–210.
17.Vestibulospinal and corticospinal modulation of lumbosacral network excitability in human subjects / D.G. Sayenko, D.A. Atkinson, A.M. Mink [et al] // Frontiers in Physiology. – 2018. – Vol. 9. – Art. 1746. DOI: 10.3389/fphys.2018.01746.
18.Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study / S. Harkema, Y. Gerasimenko, J. Hodes [et al] // Lancet. – 2011. – Vol. 377. – № 9781. – . 1938–1947.
19.Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans / C.A. Angeli, V.R. Edgerton, Y.P. Gerasimenko, S.J. Harkema // Brain. – 2014. – Vol. 137 (5). – P. 1394–1409.
20.Better functional outcome of compression spinal cord injury in mice is associated with enhanced H-reflex responses / H.J. Lee, I. Jakovcevski, N. Radonjic [et al] // Experimental Neurology. – 2009. – Vol. 216. – № 2. – P. 365–374.
21.Exercise-induced gene expression changes in the rat spinal cord / V. Perreau, P. Adlard, A. Anderson, C.Cotman//Gene Expr.–2005.–Vol.12.–P.107–121.
22.Voluntary wheel running improves recovery from a moderate spinal cord injury / C. Engesser-Cesar, A. Anderson, D. Basso [et al] // J Neurotrauma. – 2005. – Vol. 22. – P. 157–171.
23.Шенкман, Б.С. Реадаптация атрофированной мышцы: от деструкции к синтезу белка / Б.С. Шенкман // Росс. Физиол. Журн. им. И.М. Сеченова. – 2012. – Т. 98. – № 12. – С. 1471–1489.
24.Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans

/ Y. Gerasimenko, R. Gorodnichev, A. Puhov [et al] // J. Neurophysiol. – 2015. – Vol. 113. – № 3. – P. 834–842.
25.Region-Specific Responses of Adductor Longus Muscle to Gravitational Load-Dependent Activity in Wistar Hannover Rats / T. Ohira, M. Terada, F. Kawano [et al] // PLoS ONE. – 2011. – Vol.6. – №6. – P. e21044. DOI: 10.1371/journal.pone.0021044.

REFERENCES

1. Struppler A.A., Havel P.F., Angerer B.C., Havel P. Modulatory effect of repetitive peripheral magnetic stimulation on skeletal muscle tone in healthy subjects: stabilization of the elbow joint. *Experimental Brain Research*,2004,vol.18,no.1, pp. 59-66.
2. Jalinous R.A. Technical and practical aspects of magnetic nerve stimulation. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 1991, vol. 8, no. 1, pp. 10-25.
3. Komlev I.O., Kislenko A.S. Transcranial magnetic stimulation: current state and prospects for use in sports. *Relevant Issues of Physical Culture and Sports*, 2016, vol. 18, pp. 146-152. (in Russ.)
4. Edgerton V.R., Roy R.R. A new age for rehabilitation. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 99-109.
5. Dietz V., Fouad K. Restoration of sensorimotor functions after spinal cord injury. *Brain*, 2014, vol. 137, pp. 654-667.
6. Meng Z.Y., Song W.Q. Low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation improves motor dysfunction after cerebral infarction. *Neural Regeneration Research*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 610-613.
7. Inanici F., Samejima S., Gad P., Edgerton V.R., Hofstetter C.P., Moritz C.T. Transcutaneous electrical spinal stimulation promotes long-term recovery of upper extremity function in chronic tetraplegia. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 1272-1278.
8. Koryagina Yu.V., Ter-Akopov G.N., Nopin S.V., Roguleva L.G., Kostyuk E.V. Transcranial electric stimulation, endomassage and magnetic therapy to facilitate post-injury rehabilitation in elite sports. *Theory and Practice of Physical Culture*, 2019, no. 1, pp. 20-22.
9. Kilkenny C., Browne W.J., Cuthill I.C., Emerson M., Altman D.G. Improving bioscience research reporting: The ARRIVE guidelines for reporting animal research. *PLoS Biology*, 2010, vol. 8, no. 6, art. e1000412. DOI: 10.1371/journal.pbio.1000412.
10.Directive 2010/63/EU on the protection of animals used for scientific purposes. *Official Journal of the European Union*, 2010, vol. 53, pp. 33-79.
11.Morey E.R., Sabelman E.E., Turner R.T., Baylink D.J. A new rat model simulating some aspects of space flight. *Physiologist*, 1979, vol. 22, pp. 523-524.
12.Novikov V.E., Ilyin E.A. Age-related reactions of rat bones to their unloading. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1981, vol. 52, pp. 551-553.
13.Gekht B.M., Kasatkina L.F., Samojlov M.I., Sanadze A.G. Electromyography in the diagnosis of neuromuscular diseases. Taganrog: Publishing House of TSTU, 1997. 370 p. (in Russ.)
14.Pavesi G., Cattaneo L., Tinchelli S., Mancia D. Masseteric repetitive nerve stimulation in the diagnosis of myasthenia gravis. *Clinical Neurophysiology*, 2001, vol. 112, pp. 1064-1069.
15.Shcherbakova N.A., Bogacheva I.N., Zelenkova N.M., Savohin A.A., Moshonkina T.R., Gerasimenko Yu.P. Investigation of effects of the electromagnetic spinal cord stimulation on the hindlimbs muscles reflexes in narcotized rats. *Vestnik of Tver State University. Series: Biology and Ecology*, 2012, no. 26, pp. 15-22. (in Russ.)
16.Knikou M. Neurophysiological characteristics of human leg muscle action potentials evoked by transcutaneous magnetic stimulation of the spine. *Bioelectromagnetics*, 2013, vol. 34, pp. 200-210.
17.Sayenko D.G., Atkinson D.A., Mink A.M., Gurley K.M., Edgerton V.R., Harkema S.J., Gerasimenko Y.P. Vestibulospinal and corticospinal modulation of lumbosacral network excitability in human subjects. *Frontiers in Physiology*, 2018, vol. 9, art. 1746. DOI: 10.3389/fphys.2018.01746.
18.Harkema S., Gerasimenko Y., Hodes J., Burdick J., Angeli C., Chen Y., Ferreira C., Willhite A., Rejc E., Grossman R.G., Edgerton V.R. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. *Lancet*, 2011, vol. 377, no. 9781, pp. 1938–1947.
19.Angeli C.A., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., Harkema S.J. Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans. *Brain*, 2014, vol. 137, pt. 5, pp. 1394–1409.
20.Lee H.J., Jakovcevski I., Radonjic N., Hoelters L., Schachner M., Irintchev A. Better functional outcome of compression spinal cord injury in mice is associated with enhanced H-reflex responses. *Experimental Neurology*, 2009, vol. 216, no. 2, pp. 365–374.
21.Perreau V., Adlard P., Anderson A., Cotman C. Exercise-induced gene expression changes in the rat spinal cord. *Gene Expr.*, 2005, vol. 12, pp. 107–121.
22.Engesser-Cesar C., Anderson A., Basso D.,

Edgerton V., Cotman C. Voluntary wheel running improves recovery from a moderate spinal cord injury. *Journal of Neurotrauma*, 2005, vol. 22, pp. 157–171.
23.Shenkman B.S. Readaptation of atrophied muscle: from destruction to protein synthesis. *Russian Journal of Physiology*, 2012, vol. 98, no. 12, pp. 1471–1489. (in Russ.)
24.Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *Journal of Neurophysiology*, 2015, vol. 113, no. 3, pp. 834–842.
25.Ohira T., Masahiro T., Kawano F., Nakai N., Ogura A., Ohira Y. Region-specific responses of adductor longus muscle to gravitational load-dependent activity in Wistar Hannover rats. *PLoS ONE*, 2011, vol. 6, no. 6, art. e21044. DOI: 10.1371/journal.pone.0021044.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:
Никита Георгиевич Искаков – кандидат биологических наук, ведущий специалист, Поволжский ГУФКСиТ, Казань, e-mail: nikitaiskakov1992@mail.ru.
Максим Эдуардович Балтин – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Поволжский ГУФКСиТ, Казань, e-mail: baban.bog@mail.ru.
Олег Владимирович Герасимов – кандидат физико-математических наук, ведущий специалист, Поволжский ГУФКСиТ, Казань, e-mail: valeriy.karasikov@gmail.com.
Антон Александрович Еремеев – кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных, Казанский федеральный университет, Казань, e-mail: 2anton.eremeev@mail.ru.
Артур Олегович Федянин – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Поволжский ГУФКСиТ, Казань, e-mail: artishock23@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Nikita G. Iskakov – Candidate of Biological Sciences, Leading Specialist, Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, e-mail: nikitaiskakov1992@mail.ru.
Maksim E. Baltin – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, e-mail: baban.bog@mail.ru.
Oleg V. Gerasimov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Specialist, Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, e-mail: valeriy.karasikov@gmail.com.
Anton A. Eremeev – Candidate of Biological Sciences Associate Professor of the Human and Animals Physiology Department, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, e-mail: 2anton.eremeev@mail.ru.
Artur O. Fedianin – Candidate of Biological Sciences Senior Researcher, Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, e-mail: baban.bog@mail.ru.

Для цитирования: Влияние магнитной стимуляции спинного мозга при антиортостатическом вывешивании на функциональное состояние мышц голени у самцов крыс среднего возраста / Н.Г. Искаков, М.Э. Балтин, О.В. Герасимов [и др.] // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 1(31). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_7

For citation: Iskakov N.G., Baltin M.E., Gerasimov O.V., Eremeev A.A., Fedianin A.O. The effect of magnetic stimulation of the spinal cord during anti-orthostatic hanging on the functional condition of the calf muscles in middle-aged male rats. *Modern Issues of Biomedicine*, 2025, vol. 9, no. 1(31). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_7