

ФИЗИОЛОГИЯ

УДК 612.063; 612.084
DOI 10.23648/UMBJ.2018.32.22695

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

П.В. Иванов, Е.А. Михайлова, А.М. Пухов

ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта»,
г. Великие Луки, Россия

e-mail: alexander-m-p@yandex.ru

Тренировка вертикальной устойчивости и улучшение постурального контроля являются важными задачами физической реабилитации, а также физиологии труда и спорта.

Цель исследования – изучение влияния однократной чрескожной электрической стимуляции шейного утолщения спинного мозга на вертикальную устойчивость человека.

Материалы и методы. В исследованиях приняли участие 14 взрослых здоровых испытуемых мужского пола в возрасте 18–26 лет. Испытуемым однократно проводилась чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга на уровне шейных позвонков C3–C4 с частотой следования импульсов 1, 5, 15, 30 и 50 Гц и длительностью 3 и 10 мин. До и после электрического воздействия проводилась оценка устойчивости вертикального положения посредством компьютерного стабиланализатора с биологической обратной связью при выполнении разных моторных задач.

Результаты. Чрескожная электрическая стимуляция шейного утолщения спинного мозга привела к статистически достоверному изменению стабилеографических параметров, отражающих увеличение постурального контроля. Стимуляция с частотой 5, 15 и 30 Гц сопровождалась высокой эффективностью произвольного управления позы устойчивостью. В пробах с открытыми и закрытыми глазами наибольший положительный эффект достигался после стимуляции с частотой 5 и 30 Гц. При выполнении двигательной деятельности точностной направленности более выраженный эффект достигался после стимуляции с частотой 30 Гц.

Выводы. Вышесказанное свидетельствует о возможности совершенствования регуляции вертикальной позы посредством чрескожной электрической стимуляции спинного мозга и применения данного методического подхода в практике спорта.

Ключевые слова: чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, координационные способности, стабилеография.

Введение. Удержание равновесия является динамическим феноменом, проявляющимся в непрерывном движении тела или его сегментов, осуществляемом при непрерывном контроле вестибулярным, зрительным, проприоцептивным анализаторами и различными уровнями центральной нервной системы. Из этого следует, что постуральный контроль является интегральным показателем деятельности нервной системы, который отражает функциональное состояние моторной системы человека в конкретный момент времени [1].

В физиологических исследованиях для объективной оценки функционального состояния нервно-мышечного аппарата применяют электромагнитную и электрическую стимуляцию головного [2] и спинного мозга [3], периферических нервов [4]. В последние годы изменилось представление о роли спинного мозга в управлении произвольными движениями человека. Спинной мозг приобретает значение самостоятельной структурно-функциональной единицы, способной обучаться и работать автономно без участия вышележащих структур. Немаловажным

вкладом является открытие нейрональных сетей в шейном и поясничном утолщениях спинного мозга [5–6], доказывающее возможность использования их искусственного раздражения для управления вызванными и произвольными локомоциями у животных [7] и человека [8].

При изучении моторной системы человека во время овладения новыми двигательными навыками на фоне локальной силовой нагрузки нами было установлено увеличение возбудимости афферентного входа спинного мозга [9]. Опираясь на полученные результаты, мы выдвинули гипотезу о том, что искусственное раздражение афферентного входа шейного утолщения спинного мозга будет моделировать двигательную деятельность и способствовать совершенствованию координационных способностей.

Цель исследования. Изучение влияния однократной чрескожной электрической стимуляции шейного утолщения спинного мозга на вертикальную устойчивость человека.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта». В исследованиях приняли участие 14 взрослых здоровых испытуемых мужского пола в возрасте 18–26 лет. Испытуемые являлись действующими спортсменами, занимающимися футболом ($n=8$) или стрельбой из лука ($n=6$). В соответствии с принципами Хельсинкской декларации было получено письменное информированное согласие испытуемых на участие в экспериментах и разрешение комитета по этике названного вуза на проведение исследований.

Для чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) использовался двухканальный стимулятор «КУЛОН» (ГУАП, г. Санкт-Петербург). Стимулирующий электрод (катод) диаметром 30 мм располагался на коже на уровне шейных позвонков С3–С4 между остистыми отростками. Индифферентные электроды (аноды) – пластины прямоугольной формы (45×80 мм) – располагались билатерально на коже над ключицами.

Стимулирующие импульсы длительностью 1 мс имели бифазную прямоугольную форму, заполненную несущей частотой 10 кГц. Сила электрического стимула подбиралась индивидуально для каждого обследуемого, частота следования импульсов составляла 1, 5, 15, 30 и 50 Гц. Длительность стимуляции – 3 и 10 мин.

До и после электрического воздействия проводилась оценка устойчивости вертикального положения посредством компьютерного стабиланализатора с биологической обратной связью «Стабилан-01» (ЗАО ОКБ «Ритм», г. Таганрог). У испытуемых-футболистов моторная задача состояла в поддержании вертикальной позы на стабیلграфической платформе без совершения дополнительных движений в различных экспериментальных условиях зрительного и слухового восприятия. Проба с открытыми глазами выполнялась на стабیلграфической платформе в основной стойке, руки опущены вдоль туловища. Исследуемый стоял перед монитором и считал количество кругов белого цвета, предъявляемых на экране. Проба с закрытыми глазами выполнялась в том же исходном положении, и испытуемому предлагалось считать количество звуковых сигналов. Также в качестве оценки произвольного управления позной устойчивостью проводилась проба-тест «Мишень» со зрительной обратной связью. Испытуемый, стоя на платформе, должен был отклонением тела удерживать маркер в центре мишени при большом масштабе отображения. Продолжительность каждой из проб составляла 20 с.

У испытуемых-стрелков оценивалось влияние электрической стимуляции на стабیلграфические параметры в процессе выполнения выстрела из лука. Спортсмены-лучники до и после стимуляции, стоя на стабیلграфической платформе, выполняли по 6 выстрелов на дистанции 30 м. При этом результат попаданий не учитывался, оценивались только параметры зарегистрированных статокинезиограмм.

Анализировались следующие параметры статокинезиограммы: разброс по фронтальной и сагиттальной осям (мм); площадь эллипса (мм²); длина траектории центра давле-

ния (ЦД) по фронтальной и сагиттальной осям (мм); средняя линейная скорость (мм/с); средняя угловая скорость (град/с); средняя линейная скорость по фронтальной и сагиттальной осям (мм/с).

Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью специализированной программы Statistica 10. Достоверность различий показателей до и после стимуляции определялась с помощью однофакторного анализа для повторных измерений (ANOVA). При $p < 0,05$ различия считались статистически значимыми. В некоторых случаях для сравнения исследуемых параметров изменения этих величин рассчитывались в процентах.

Результаты. Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе на здоровых добровольцах осуществлялся поиск оптимальных параметров ЧЭССМ для повышения качества вертикальной устойчивости. Для этого была апробирована электрическая стимуляция шейного утолщения спинного мозга на уровне С3–С4 позвонков с различной частотой (1, 5, 15, 30, 50 Гц) и длительностью стимуляции (3, 10 мин). Стимуляция с большей продолжительностью не рассматривалась, так как предполагалось использование ЧЭССМ перед началом соревнований во время разминки. Сила стимуляционного тока подбиралась индивидуально для каждого испытуемого и не должна была вызывать дискомфортных ощущений.

В ходе пилотных исследований пришлось отказаться от стимуляции с частотой 1 Гц и от 10-минутной стимуляции на всех частотах. Частота стимуляции 1 Гц вызывала у испытуемых дискомфорт вследствие односторонних сокращений мышц шеи на каждый импульс, сопровождаемых движением головы. Длительность стимуляции 10 мин приводила к тоническому перенапряжению мышц шеи. При стимуляции с частотой 50 Гц только средняя угловая скорость колебаний центра давления имела тенденцию к уменьшению. Остальные показатели увеличивались, что свидетельствовало о снижении контроля вертикальной позы. Анализ направленности изменений показателей стабилограммы позволил выявить оптимальные частоты однократной чрескожной электрической стимуля-

ции (5, 15 и 30 Гц), которые применялись в дальнейших исследованиях.

На следующем этапе работы проводилась экспериментальная проверка разработанной методики. Представители различных видов спорта являются наиболее подходящей моделью для оценки эффективности неинвазивных и немедикаментозных воздействий на организм человека. Спортсмены-футболисты как представители игровых видов спорта адаптированы к оперативному решению возникающих игровых ситуаций, имеют большой багаж разнообразных сложнокоординационных двигательных навыков. В их профессиональной деятельности динамическая вертикальная устойчивость позволяет эффективно выполнять технические приемы с частой сменой направления движений и переходить от одного двигательного действия к другому без потери времени. Стрелкам из лука, напротив, свойственна статичность выполнения двигательных действий, и результат их выступления во многом определяется умением поддерживать вертикальную устойчивость во время выстрела.

При сравнении влияния электрической стимуляции с различной частотой на показатели, характеризующие вертикальную устойчивость футболистов, было выявлено, что стимуляция с частотой 5 Гц оказывала наиболее благоприятный эффект на способность к поддержанию ортоградной позы в пробах со зрительным контролем. Разброс колебаний ЦД по фронтальной оси уменьшился на 19,8 % ($p > 0,05$), площадь эллипса статокинезиограммы после стимуляции уменьшилась на 25,2 % ($p > 0,05$). Изменения остальных параметров находились в диапазоне от 1,6 до 8,9 %. При использовании этой частоты стимулов незначительно увеличились только колебания центра давления по сагиттальной оси – на 1,5 % ($p > 0,05$). В пробах со зрительной депривацией стимуляция с частотой 5 Гц положительно влияла на меньшее число исследуемых показателей. Уменьшение разброса колебаний в пробе с закрытыми глазами происходило как по фронтальной, так и по сагиттальной осям – на 20,6 и 7,5 % соответственно. Но при этом увеличились угловая и линейная скорости колебаний ЦД. В пробе

«Мишень» после стимуляции 5 Гц статистически значимых изменений статокинезиограммы не выявлено. Разброс колебаний ЦД по осям движения после применения стимуляции незначительно увеличился по фронтальной оси на 6 % ($p > 0,05$) и сагиттальной оси – на 2 % ($p > 0,05$), а скорость колебаний ЦД уменьшилась на 10 % ($p > 0,05$).

Стимуляция с частотой импульсов 15 Гц не оказывала значительного влияния на стабилографические показатели в пробе с открытыми глазами. Тенденция к уменьшению проявлялась только в разбросе колебаний по фронтальной оси (на 4,7 % ($p > 0,05$)) и средней угловой скорости колебаний ЦД (на 18,5 % ($p > 0,05$)). В пробе без зрительного контроля такая частота стимуляции способствовала уменьшению разброса колебаний по фронтальной и сагиттальной осям на 5,4 и 15,9 % ($p > 0,05$) соответственно. Уменьшение линейной скорости и длины траектории колебаний было зарегистрировано только по фронтальной оси. Положительное влияние электрическая стимуляция с частотой 15 Гц оказала на качество вертикальной устойчивости в пробе с биологической обратной связью (тест «Мишень»). Все параметры статокинезиограммы были меньше, чем в контрольной пробе. Достоверно уменьшился разброс колебаний по сагиттальной оси – на 14,7 % ($p < 0,05$), длина траектории колебаний ЦД по фронтальной оси – на 30,2 % ($p < 0,05$), средняя линейная скорость колебаний ЦД по фронтальной оси – на 30,0 % ($p < 0,05$).

Аналогичные по характеру изменения происходили в параметрах статокинезиограммы при применении стимуляции с частотой 30 Гц. Повышение качества вертикальной устойчивости в большей степени проявлялось в пробе «Мишень» и выражалось в уменьшении разброса колебаний ЦД по фронтальной оси по сравнению с фоном на 27,6 % ($p < 0,05$), длины траектории и линейной скорости колебаний на 35 % ($p < 0,05$). Изменения остальных характеристик статокинезиограммы находились на уровне тенденции и понизились в диапазоне от 4,2 до 24,2 %.

Таким образом, электрическая стимуляция с частотой 5 Гц способствовала повышению качества вертикальной устойчивости

футболистов в пробе со зрительным контролем, а стимуляция с частотой 15 и 30 Гц в большей степени влияла на способность поддержания вертикальной позы с произвольной её регуляцией в условиях биологической обратной связи.

У стрелков из лука проводилось исследование влияния стимуляции с частотой 5 и 30 Гц на стабилографические показатели при выполнении выстрела (табл. 1). ЧЭССМ при каждой выбранной частоте оказала положительное влияние на координационные способности лучников. Необходимо отметить, что увеличение устойчивости вертикальной позы после стимуляции 5 и 30 Гц сопровождалось тенденцией к увеличению средней угловой скорости.

После стимуляции 5 Гц наблюдалось снижение длины траектории центра давления по фронтальной и сагиттальной осям на 29,3 ($p < 0,05$) и 26,8 % ($p < 0,05$) соответственно. Площадь эллипса уменьшилась на 25,2 % ($p < 0,05$). Остальные параметры статокинезиограммы после стимуляции также снизились, но не достигали статистически значимого уровня.

После чрескожной электрической стимуляции с частотой стимула 30 Гц также наблюдалось уменьшение показателей статокинезиограммы практически по всем характеристикам за исключением средней угловой скорости. После стимуляции с частотой 30 Гц сократилась длина траектории ЦД по фронтальной и сагиттальной осям на 34,2 ($p < 0,05$) и 37,2 % ($p < 0,05$) соответственно, разброс по сагиттальной оси уменьшился на 25,3 % ($p < 0,05$), а разброс по фронтальной – на 1,8 % ($p > 0,05$). Площадь эллипса уменьшилась на 25,3 % ($p < 0,05$).

После стимуляции 5 Гц наблюдалось снижение длины траектории центра давления по фронтальной и сагиттальной осям на 29,3 ($p < 0,05$) и 26,8 % ($p < 0,05$) соответственно. Площадь эллипса уменьшилась на 25,2 % ($p < 0,05$). Остальные параметры статокинезиограммы после стимуляции также снизились, но не достигали статистически значимого уровня.

После чрескожной электрической стимуляции с частотой стимула 30 Гц также на-

блюдалось уменьшение показателей статокинезиограммы практически по всем характеристикам за исключением средней угловой скорости. После стимуляции с частотой 30 Гц сократилась длина траектории ЦД по фронтальной и сагиттальной осям на 34,2 ($p<0,05$) и 37,2 % ($p<0,05$) соответственно, разброс по сагиттальной оси уменьшился на 25,3 % ($p<0,05$), а разброс по фронтали – на 1,8 %

($p>0,05$). Площадь эллипса уменьшилась на 25,3 % ($p<0,05$).

Полученные результаты позволяют говорить о положительном влиянии ЧЭССМ на вертикальную устойчивость при выполнении точностной двигательной деятельности. Необходимо отметить более выраженный эффект после стимуляции с частотой 30 Гц по сравнению со стимуляцией 5 Гц.

Таблица 1

**Показатели статокинезиограммы у спортсменов-лучников
при выполнении выстрела до и после ЧЭССМ ($M\pm m$)**

Показатели статокинезиограммы	Контроль	Стимуляция 3 мин, 5 Гц	Стимуляция 3 мин, 30 Гц
Разброс по фронтальной оси, мм	3,65±0,28	3,30±0,45	3,58±0,60
Разброс по сагиттальной оси, мм	3,49±0,22	2,87±0,27*	2,74±0,35*
Площадь эллипса, мм ²	142,85±19,54	106,81±35,97*	106,71±28,06*
Длина траектории ЦД по фронтальной оси, мм	65,47±8,47	46,28±7,10*	43,08±6,85*
Длина траектории ЦД по сагиттальной оси, мм	62,64±6,47	45,83±5,62*	39,34±4,87*
Средняя угловая скорость, град/с	31,47±1,25	32,58±2,25	32,70±2,66
Средняя линейная скорость по фронтальной оси, мм/с	13,75±1,56	11,03±1,48	13,13±2,74
Средняя линейная скорость по сагиттальной оси, мм/с	13,50±1,59	10,96±1,39	12,15±2,20

Примечание. * – достоверность различий параметров статокинезиограммы по сравнению с контрольной пробой, $p<0,05$.

Обсуждение. Удержание вертикальной позы – это результат сложного взаимодействия нескольких видов афферентации: проприоцептивной, вестибулярной и зрительной [10]. Базовые механизмы регуляции позы осуществляются на уровне ствола и спинного мозга. Доказана способность спинальных сетей самостоятельно осуществлять поструральный контроль с учетом афферентного входа от опорно-двигательного аппарата в условиях дополнительной тонической стимуляции, заменяющей сигналы из стволовых центров [11]. Сочетание чрескожной электрической стимуляции спинного мозга с локомоторным тренингом у больных детским церебральным параличом сопровождается тенденцией к поддержанию проекции центра масс тела

в сагиттальной плоскости в нормальном положении [12].

В собственных исследованиях изучено влияние электрической стимуляции шейного утолщения спинного мозга на функциональные параметры, отражающие качество поструральной устойчивости человека, на примере представителей различных видов спорта. Электрический ток относительно небольшой силы через кожу воздействует на шейное утолщение спинного мозга на уровне С3–С4 позвонков, происходит искусственное раздражение дорсальных корешков, которые связаны с афферентами вестибулярного аппарата человека [13]. Можно предположить, что электрическая стимуляция на уровне С3–С4 шейных позвонков, воздействуя на

центростремительные проводящие пути спинного мозга, отвечающие за функцию равновесия, моделирует сигналы, поступающие от проприорецепторов при произвольной двигательной активности, с чем и связан эффект улучшения постурального контроля после сеанса ЧЭССМ, полученный в собственных исследованиях.

Нейрофизиологические исследования показывают, что эффект от чрескожной электрической стимуляции нервной системы зависит от места воздействия, его продолжительности, силы и частоты [14]. Результаты собственных исследований показывают, что после ЧЭССМ различной частоты происходит улучшение позной устойчивости спортсменов, что проявляется в уменьшении основных стабильнографических показателей статокенизограммы.

В пилотных исследованиях выявлено снижение практически всех изучаемых параметров статокенизограммы у спортсменов после трехминутной электрической стимуляции шейного утолщения спинного мозга с частотой стимула 30 Гц. Амплитуда постуральных ответов у стоящих испытуемых снижается при увеличении частоты билатеральной биполярной синусоидальной гальванической стимуляции [15]. При использовании стохастической вестибулярной гальванической стимуляции исключение низких частот также приводит к уменьшению колебаний тела [16].

В исследованиях по влиянию ЧЭССМ на люмбальный отдел спинного мозга показана эффективность стимуляции с частотой от 5 до 40 Гц для вызова непроизвольных локомоций. Стимуляция с частотой 1 Гц вызывала только рефлекторные ответы с мышцами-мишеней и была не способна активировать спинальные нейрональные сети для запуска локомоций [17]. Эти данные соотносятся с результатами наших исследований, в которых на стимуляцию 1 Гц наблюдался моторный ответ мышц шеи, а эффект на поддержание вертикальной устойчивости спортсменов в разной степени оказывался при частоте импульсации 5, 15 и 30 Гц. В работах по изучению гальванической стимуляции также зарегистрированы отклонения от общего паттер-

на деактивации разных областей мозга при стимуляции с частотой 1 и 2 Гц. При стимуляции с частотой 5 Гц вместо деактивации соматосенсорной коры имела место ее активация [18]. Увеличение частоты стимуляции люмбального отдела спинного мозга более 40 Гц приводило к уменьшению активности тонических скелетных мышц голени [19]. Вероятно, схожий эффект проявляется и при стимуляции шейного отдела спинного мозга, так как стимуляция с частотой 50 Гц сопровождалась увеличением параметров статокенизограммы.

При мультисегментарной ЧЭССМ происходит конвергенция нисходящих и восходящих влияний на нейронные сети, ответственные за регуляцию как локомоторных, так и постуральных функций [12]. Селективное воздействие ЧЭССМ на нейрональные структуры спинного мозга также оказывает влияние на постуральный контроль, что отразилось в снижении параметров статокенизограммы.

Результаты проведенных экспериментов позволили установить изменения ряда функциональных параметров, отражающих состояние центральных уровней моторной системы, под влиянием чрескожного электрического воздействия на спинной мозг. Чрескожная электрическая стимуляция шейного утолщения спинного мозга привела к статистически достоверному изменению стабильнографических параметров, отражающих увеличение постурального контроля. Как возможный вариант объяснения полученных результатов увеличения позной устойчивости, вызываемого ЧЭССМ, также можно рассматривать повышение проводимости через синапсы, увеличение возбудимости афферентного входа, модификацию супраспинальной нейрональной активности, поступающей к нейронам спинного мозга.

Заключение. Результаты исследования показали, что чрескожная электрическая стимуляция шейного утолщения спинного мозга может повысить качество постурального контроля у человека как при зрительном контроле, так и в условиях зрительной депривации. Наиболее выраженная положительная динамика вертикальной устойчивости при ис-

пользовании ЧЭССМ проявлялась в пробах с произвольным контролем.

Значительные изменения в показателях статокинезиограммы во время зрительного контроля достигались при стимуляции спинного мозга с частотой 5 Гц. Существенные уменьшения колебаний центра давления и скоростей колебаний в пробе с биологически об-

ратной связью регистрировались после применения стимуляции с частотой 15 и 30 Гц. Положительное влияние электрической стимуляции на моторные функции раскрывает перспективы использования различных режимов электрического воздействия в процессе развития и совершенствования качества вертикальной устойчивости у спортсменов.

Литература

1. Терехов А.В. Математическое моделирование регулирования вертикальной позы человека: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.; 2007. 24.
2. Казенников О.В., Левик Ю.С. Исследование возбудимости моторной коры в задаче удержания груза. Физиология человека. 2009; 35 (5): 71–78.
3. Якупов Р.Н., Котова Е.Ю., Балыкин Ю.М., Машин В.В., Балыкин М.В., Герасименко Ю.П. Влияние чрескожной электростимуляции спинного мозга и механотерапии на возбудимость спинальных нейронных сетей и локомоторные функции пациентов с нарушениями мозгового кровообращения. Ульяновский медико-биологический журнал. 2016; 4: 121–128.
4. Поварещенкова Ю.А., Лапченков А.В., Михайлова Е.А. Контроль функционального состояния нейромоторного аппарата спортсменов. Теория и практика физической культуры. 2010; 6: 45–47.
5. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С., Казенников О.В., Селионов В.А. Существует ли генератор шагательных движений у человека? Физиология человека. 1998; 24 (3): 42–50.
6. 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 multi-site transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in non-injured humans. Neurophysiology. 2015; 113 (3): 834–842.
7. Bogacheva I.N., Musienko P.E., Shcherbakova N.A., Moshonkina T.R., Savokhin A.A., Gerasimenko Yu.P. Analysis of locomotor activity in decerebrate cats using electromagnetic and epidural electrical stimulation of the spinal cord. Neuroscience and Behavioral Physiology. 2014; 44 (5): 552–559.
8. Щербакова Н.А., Мошонкина Т.Р., Савохин А.А., Селионов В.А., Городничев Р.М., Герасименко Ю.П. Неинвазивный метод управления спинальными локомоторными сетями человека. Физиология человека. 2016; 42 (1): 73.
9. Пухов А.М., Иванов С.А., Мачуева Е.Н., Михайлова Е.А., Моисеев С.А. Пластичность моторной системы человека под воздействием локальной физической нагрузки. Ульяновский медико-биологический журнал. 2017; 1: 114–122.
10. Мельников А.А., Викулов А.Д., Малахов М.В. Функция равновесия у спортсменов-борцов. Ярославль: ЯГПУ; 2016. 150.
11. Мусиенко П.Е., Горский О.В., Килимник В.А., Козловская И.Б., Куртин Г., Эджерстон В.Р., Герасименко Ю.П. Регуляция позы и локомоции у децеребрированных и спинализированных животных. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2013; 99 (3): 392–405.
12. Никитюк И.Е., Мошонкина Т.Р., Герасименко Ю.П., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г. Регуляция баланса у детей с тяжелыми формами детского церебрального паралича после локомоторных тренировок в комбинации с электростимуляцией мышц и спинного мозга. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2016; 93 (5): 23–27.
13. Гладченко Д.А., Иванов С.М., Мачуева Е.Н., Пухов А.М., Моисеев С.А., Пискунов И.В., Городничев Р.М. Параметры моторных ответов человека при чрескожной электрической и электромагнитной стимуляции различных сегментов спинного мозга. Ульяновский медико-биологический журнал. 2016; 2: 132–140.
14. Якупов Р.Н., Балыкин Ю.М., Котова Е.Ю., Балыкин М.В., Герасименко Ю.П. Изменение силовых показателей мышц нижних конечностей при чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. Ульяновский медико-биологический журнал. 2015; 4: 99–103.
15. Latt L.D., Sparto P.J., Furman J.M., Redfern M.S. The steady-state postural response to continuous sinusoidal galvanic vestibular stimulation. Gait Posture. 2003; 18 (2): 64–72.

16. Dakin C.J., Luu B.L., Van den Doel K., Inglis J.T., Blouin J-S. Frequency-specific modulation of vestibular-evoked sway responses in humans. *J. Neurophysiology*. 2010; 103 (2): 1048–1056.
17. Городничев Р.М., Пивоварова Е.А., Пухов А.М., Моисеев С.А., Савохин А.А., Мошонкина Т.Р., Щербакова Н.А., Килимник В.А., Селионов В.А., Козловская И.Б., Эджерстон Р., Герасименко Ю.П. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека. *Физиология человека*. 2012; 38 (2): 46–56.
18. Stephan T., Deutschlander A., Nolte A., Schneider E., Wiesmann M., Brandt T., Dieterich M. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation with alternating currents at different frequencies. *J. Neuroimage*. 2005; 26 (3): 721–732.
19. Fabien B. Wagner, Jean-Baptiste Mignardot, Camille G. Le Goff-Mignardot, Grégoire Courtine. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *J. Nature*. 2018; 563 (7729): 65–71.

EFFECT OF SPINAL CORD ELECTROSTIMULATION ON HUMAN VERTICAL STABILITY

P.V. Ivanov, E.A. Mikhailova, A.M. Pukhov

Velikie Luki State Academy of Physical Culture and Sport, Velikie Luki, Russia

e-mail: alexander-m-p@yandex.ru

Vertical stability training and postural control improvement are important tasks of physical rehabilitation, occupational physiology and sport physiology.

The objective of the research is to study the effect of a single-shot transcutaneous electrical stimulation of the cervical spinal cord thickening on human vertical stability.

Materials and Methods. The study involved 14 adult healthy male subjects aged 18–26. The trial subjects underwent a single-shot transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord at the C3–C4 cervical vertebra level, pulse-recurrence rate was 1, 5, 15, 30 and 50 Hz, the procedure lasted 3 and 10 min. The authors evaluated vertical stability of the trial subjects while they were performing various motor tasks before and after the electrical stimulation. Biofeedback computer stabiloanalyzer was used to complete the task.

Results. Percutaneous electrical stimulation of the cervical spinal cord thickening led to a statistically significant change in stabilographic parameters, which reflect an increase in postural control. Stimulation at a frequency of 5, 15 and 30 Hz was followed by high efficiency of postural stability arbitrary control. In tests with open and closed eyes, the greatest positive effect was achieved after 5 and 30 Hz frequency stimulation. When performing precision-directed motor activity, a more prominent effect was achieved after 30 Hz frequency stimulation.

Conclusion. The data obtained indicate the possibility to improve vertical posture regulation by means of transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord and using this methodological approach in sports.

Keywords: *transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, coordination abilities, stabilography.*

References

1. Terekhov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie regulirovaniya vertikal'noy pozy cheloveka* [Mathematical modeling of the human vertical posture regulation]: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Moscow; 2007. 24 (in Russian).
2. Kazennikov O.V., Levik Yu.S. *Issledovanie vzbudimosti motornoy kory v zadache uderzhaniya gruzha* [Study of motor cortex excitability in the load holding task]. *Fiziologiya cheloveka*. 2009; 35 (5): 71–78 (in Russian).
3. Yakupov R.N., Kotova E.Yu., Balykin Yu.M., Mashin V.V., Balykin M.V., Gerasimenko Yu.P. *Vliyanie chreskoznoy elektrostimulyatsii spinno go mozga i mekhanoterapii na vzbudimost' spinal'nykh neyronnykh setey i lokomotornye funktsii patsientov s narusheniyami mozgovogo krovoobrashcheniya* [Effect of transcutaneous electrical spinal cord stimulation and mechanotherapy on excitability of spinal neural networks and locomotor function in patients with cerebral circulation disorders]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2016; 4: 121–128 (in Russian).
4. Povareshchenkova Yu.A., Lapchenkov A.V., Mikhaylova E.A. *Kontrol' funktsional'nogo sostoyaniya neyromotornogo apparata sportsmenov* [Control of functional state of neuromotor apparatus in athletes]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*. 2010; 6: 45–47 (in Russian).

5. Gurfinkel' V.S., Levik Yu.S., Kazennikov O.V., Selionov V.A. Sushchestvuet li generator shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka [Is there a generator of pacing movements in humans]? *Fiziologiya cheloveka*. 1998; 24 (3): 42–50 (in Russian).
6. 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 multi-site transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in non-injured humans. *Neurophysiology*. 2015; 113 (3): 834–842.
7. Bogacheva I.N., Musienko P.E., Shcherbakova N.A., Moshonkina T.R., Savokhin A.A., Gerasimenko Yu.P. Analysis of locomotor activity in decerebrate cats using electromagnetic and epidural electrical stimulation of the spinal cord. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2014; 44 (5): 552–559.
8. Shcherbakova N.A., Moshonkina T.R., Savokhin A.A., Selionov V.A., Gorodnichev R.M., Gerasimenko Yu.P. Neinvazivnyy metod upravleniya spinal'nymi lokomotornymi setyami cheloveka [Noninvasive method to control the human spinal locomotor nets]. *Fiziologiya cheloveka*. 2016; 42 (1): 73 (in Russian).
9. Pukhov A.M., Ivanov S.A., Machueva E.N., Mikhaylova E.A., Moiseev S.A. Plastichnost' motornoy sistemy cheloveka pod vozdeystviem lokal'noy fizicheskoy nagruzki [Human motor system plasticity under local physical load]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal*. 2017; 1: 114–122 (in Russian).
10. Mel'nikov A.A., Vikulov A.D., Malakhov M.V. *Funktsiya ravnovesiya u sportsmenov-bortsov* [Balance function in wrestlers]. Yaroslavl': YaGPU; 2016. 150 (in Russian).
11. Musienko P.E., Gorskiy O.V., Kilimnik V.A., Kozlovskaya I.B., Kurtin G., Edzherton V.R., Gerasimenko Yu.P. Regulyatsiya pozy i lokomotsii u detserebrirovannykh i spinalizirovannykh zhivotnykh [Neuronal control of posture and locomotion in decerebrated and spinalized animals]. *Rossiyskiy fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2013; 99 (3): 392–405 (in Russian).
12. Nikityuk I.E., Moshonkina T.R., Gerasimenko Yu.P., Vissarionov S.V., Baindurashvili A.G. Regulyatsiya balansa u detey s tyazhelymi formami detskogo tserebral'nogo paralicha posle lokomotornykh trenirovok v kombinatsii s elektrostimulyatsiyey myshts i spinnogo mozga [Balance regulation in children with severe cerebral palsy after locomotor training in combination with electrical stimulation of leg muscles and spinal cord]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kul'tury*. 2016; 93 (5): 23–27 (in Russian).
13. Gladchenko D.A., Ivanov S.M., Machueva E.N., Pukhov A.M., Moiseev S.A., Piskunov I.V., Gorodnichev R.M. Parametry motornykh otvetov cheloveka pri chreskoznoy elektricheskoy i elektromagnitnoy stimulyatsii razlichnykh segmentov spinnogo mozga [Parameters of human motor responses under transcutaneous electrical and electromagnetic stimulation of various segments of the spinal cord]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal*. 2016; 2: 132–140 (in Russian).
14. Yakupov R.N., Balykin Yu.M., Kotova E.Yu., Balykin M.V., Gerasimenko Yu.P. Izmenenie silovykh pokazateley myshts nizhnikh konechnostey pri chreskoznoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga [Changes in the force indices of the lower limb muscles during transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal*. 2015; 4: 99–103 (In Russian).
15. Latt L.D., Sparto P.J., Furman J.M., Redfern M.S. The steady-state postural response to continuous sinusoidal galvanic vestibular stimulation. *Gait Posture*. 2003; 18 (2): 64–72.
16. Dakin C.J., Luu B.L., Van den Doel K., Inglis J.T., Blouin J-S. Frequency-specific modulation of vestibular-evoked sway responses in humans. *J. Neurophysiology*. 2010; 103 (2): 1048–1056.
17. Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Pukhov A.M., Moiseev S.A., Savokhin A.A., Moshonkina T.R., Shcherbakova N.A., Kilimnik V.A., Selionov V.A., Kozlovskaya I.B., Edzherton R., Gerasimenko Yu.P. Chreskozhnaya elektricheskaya stimulyatsiya spinnogo mozga: neinvazivnyy sposob aktivatsii generatorov shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka [Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: A noninvasive tool for activation of stepping pattern generators in humans]. *Fiziologiya cheloveka*. 2012; 38 (2): 46–56 (in Russian).
18. Stephan T., Deutschlander A., Nolte A., Schneider E., Wiesmann M., Brandt T., Dieterich M. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation with alternating currents at different frequencies. *J. Neuroimage*. 2005; 26 (3): 721–732.
19. Fabien B. Wagner, Jean-Baptiste Mignardot, Camille G. Le Goff-Mignardot, Grégoire Courtine. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *J. Nature*. 2018; 563 (7729): 65–71.