

ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ И МЕДИЦИНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Rehabilitation Medicine and Medical Rehabilitation Technologies

Обзорная статья / Review article

DOI: <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-99-5-53-61>

УДК: 616.8-009.1-085.851.8



Применение имитирующих шагоподобные движения механотерапевтических устройств в сочетании с электростимуляцией у пациентов со спинальной травмой

Даминов В.Д., Ткаченко П.В., Низаметдинова А.А.

Национальный медико-хирургический центр имени Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва, Россия

Резюме

У пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой (ПСМТ) возможно вызвать шагоподобные движения в нижних конечностях, что подтверждается данными мировой научной литературы. Это было выявлено при проведении электростимуляции с наложением электродов на определенные участки спинного мозга в сочетании с механотерапией. Кроме того, было отмечено снижение повышенного мышечного тонуса в конечностях, инструментально подтвердилось улучшение нервно-мышечной проводимости и переносимость возрастающего воздействия стимуляции. Установлено, что при изолированном использовании одного из указанных методов, невозможно достичь того же эффекта, как при их совместном применении. Первые исследования проводились путем имплантации эпидуральных электродов в спинной мозг, позднее – сочетанием электростимуляции и шагоподобных движений, которые задавались ручным методом с частотой, совпадающей с частотой стимуляции. С развитием техники, появлением новых средств и методов, стимуляция стала накожной, а движения осуществлялись с помощью роботизированной механотерапии. Преимущество последнего метода очевидно: от специалиста требуется задать исходные параметры, которые подбираются индивидуально для пациента, проследить за ходом выполнения процедуры, зафиксировать изменения.

К этим устройствам относятся роботизированные комплексы, осуществляющие движения в нижних конечностях с полной и частичной осевой нагрузками. В настоящее время в клинике реабилитации ФГБУ «НМХЦ им. Н. И. Пирогова» Минздрава России проводится исследование на аппарате для роботизированной терапии в безопасном состоянии. Его неоспоримое преимущество – безопасность, испытуемый занимается в условиях полной разгрузки веса тела. Одновременно с роботизированной терапией проводится мультимодальная электростимуляция: чрескожная электростимуляция спинного мозга (ЧЭССМ) и функциональная электростимуляция (ФЭС) мышц нижних конечностей, спины и живота. Установлено, что у пациентов достоверно улучшаются показатели неврологического статуса. В данной статье приведены результаты клинической апробации метода роботизированной механотерапии в безопасном состоянии в реабилитации пациентов с ПСМТ.

Ключевые слова: безопасность, подвесная система, электростимуляция, реабилитация, локомоция, парез, позвоночно-спинномозговая травма

Для цитирования: Даминов В.Д., Ткаченко П.В., Низаметдинова А.А. Применение имитирующих шагоподобные движения механотерапевтических устройств в сочетании с электростимуляцией у пациентов со спинальной травмой. Вестник восстановительной медицины. 2020; 5 (99): 53–61. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-99-5-53-61>

Для корреспонденции: Ткаченко Полина Владимировна, e-mail: p.nikitchenko@gmail.com

Статья получена: 12.09.2020

Статья принята к печати: 26.09.2020

Опубликована онлайн: 30.10.2020

Application of the Mechanotherapy Devices Simulating Step-Like Movements in Combination with Electrical Stimulation in Spinal Cord Injury Patients

Daminov V.D., Tkachenko P.V., Nizametdinova A.A.

Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Summarizing the results of the world scientific data on this topic, the possibility to evoke step-like movements in the lower limbs of patients with spinal cord injury (SCI) below the level of damage was noted. That was verified during electrical stimulation in combination with mechanotherapy, the electrodes application to the definite areas of spinal cord. In addition, we stated that these measures led to reduction of muscle hypertonus in the lower limbs, improvement of neuromuscular junction and tolerance towards increasing stimulation that were instrumentally confirmed. We stated that it is impossible to achieve the same effect using only one of these methods isolated. The first studies were carried out by implantation of epidural electrodes in the spinal cord, and later by a combination of electrical stimulation and step-like movements with the same frequency setting manually. During further technology development, stimulation became percutaneous, and the movements were carried out using robotic mechanotherapy. The advantage of this method is obvious: the specialist needs to set the initial parameters which are selected individually for the patient, to monitor the progress of the procedure and to fix changes. These devices include robotic systems which perform movements in the lower extremities with full and partial axial load. Currently a study of the device for robotic therapy in horizontal unsupported state is ongoing in rehabilitation clinic of FSBI NMCC n.a.N.I. Pirogov. Its excellence is support absense, the training is held in conditions of complete body weight unloading. Multimodal electrical stimulation is performed simultaneously with robotic therapy: percutaneous electrical stimulation of the spinal cord and functional electrical stimulation (FES) of the legs, back and abdomen muscles. It was stated that parameters of neurological status were improved significantly. This article presents the results of unsupported robotic mechanotherapy's clinical testing in the SCI patients rehabilitation.

Keywords: suspension, sling system, electrical stimulation, rehabilitation, locomotion, paresis, spinal cord injury

For citation: Daminov V.D., Tkachenko P.V., Nizametdinova A.A. Application of the Mechanotherapy Devices Simulating Step-Like Movements in Combination with Electrical Stimulation in Spinal Cord Injury Patients. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2020; 5 (99): 53-61. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-99-5-53-61>

For correspondence address: Polina V. Tkachenko, e-mail: p.nikitchenko@gmail.com

Received: Sept 12, 2020

Accepted: Sept 26, 2020

Published online: Oct 30, 2020

Локомоция – это разновидность движений животных и человека, связанная с их активным перемещением в пространстве. Локомоция у позвоночных, к которым относится и человек, представлена множеством разновидностей: ходьба, бег, плавание, полет, прыгание, лазание, ползание и т.д. [1]. У человека основным видом локомоции является ходьба. Ходьба представляет собой автоматизированный двигательный акт, осуществляющийся в результате сложной скоординированной деятельности скелетных мышц туловища и конечностей. В случае нарушения координации последних, ходьба приобретает патологический вид, либо пропадает как функция в целом. В клинической практике такие нарушения встречаются у неврологических пациентов, в том числе, с травматической болезнью спинного мозга (ТБСМ). Одними из основных последствий ТБСМ являются парезы и связанные с ними нарушения функции ходьбы различной степени выраженности.

У пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой (ПСМТ) согласно шкале тяжести повреждения спинного мозга ASIA возможны два вида нарушений:

- полное – отсутствие двигательной и чувствительной функций ниже уровня поражения с обязательным отсутствием чувствительности в нижних сакральных (S4–S5) сегментах;
- неполное – отсутствие или сохранение чувствительности, движений, попыток к ним ниже уровня повреждения с обязательным сохранением чувствительности в нижних сакральных сегментах.

Запуск шагоподобных движений у пациентов с ПСМТ посредством мануальных и автоматизированных методов

Частую, у пациентов с ПСМТ движения в ногах отсутствуют полностью (плегия), нарушается трофика мышц ниже уровня повреждения, костно-суставного аппарата, возникают различные дегенеративные изменения (гипотрофия мышц, остеопороз, остеоартроз,

формирование анкилозов и контрактур). Лечебная гимнастика является средством профилактики развития подобных осложнений и восстановления нарушенных функций. Для пациентов с ПСМТ эффективно проводить гимнастику в условиях разгрузки веса на подвесных системах (слинг-системах). Для данного вида терапии характерно выполнение движений без боли [2], в том объеме и на том уровне, который является свободным для пациента при условии активации глубоких мышц. Возможны два основных способа воздействия: длительное статическое напряжение мышц и стимуляция сенсорного контроля нервной системы. В слинг-системах создается нестабильность того или иного сегмента тела, за счет чего вызывается большая нагрузка для мышц, вынуждая их «включаться» в процесс тренировки. Так, разгрузив шейный и грудной отделы позвоночника, но, создав нестабильность в паретичных ногах, достоверно можно заметить укрепление мышц-сгибателей, мышц-разгибателей бедра, мышц поясничного отдела, в зависимости от расположения пациента в подвесной системе. Удобство подвесных систем в том, что можно «выключить» зону, воздействие на которую не требуется, тем самым сконцентрировать работу на проблемной зоне. Шагоподобные движения при применении лечебной гимнастики и подвесных систем могут запускаться только мануальным способом.

Помимо мануальных методов, в последние десятилетия широкое распространение в реабилитации пациентов с ПСМТ получила роботизированная механотерапия [3]. «Локомат», «Эриго», «ЕхоАтлет» и др. – все перечисленные роботизированные устройства имитируют шагоподобные движения или же непосредственно ходьбу [4]. Пациент при этом находится либо в условиях разгрузки («Локомат»), либо же в пассивном состоянии под действием полной осевой нагрузки («ЕхоАтлет») [5]. Клиническая эффективность данных устройств была доказана в многочисленных исследованиях [6, 7, 8, 9, 10].

Применение различных видов электростимуляции в сочетании с роботизированной механотерапией и без нее

Применение одновременно с занятиями в роботизированных тренажерах электростимуляции стало эффективным способом реабилитации пациентов с ПСМТ. Сначала электростимуляцию проводили путем имплантации электростимулятора эпидурально (генератор электрических импульсов имплантируется подкожно, управляется дистанционно с пульта). Эффекты от электростимуляции спинного мозга (ЭССМ) были описаны в большом количестве работ: 1) на частоте 50–100 Гц – отмечалось снижение спастичности [11]; 2) на частоте 25–60 Гц – вызывалась ритмичная моторная активность в парализованных конечностях, данные подтверждались с помощью электромиографии [12, 13]; 3) на частоте 5–15 Гц – появлялся разгибательный ответ в мышцах нижних конечностей [14]. Однако, поскольку процедура инвазивная, она связана с рядом осложнений как местного, так и общего характера. Так, высокая плотность электрического тока в месте контакта электрода с мягкими тканями и структурами спинного мозга может приводить к их непреднамеренной травматизации, длительное нахождение электродов в организме – к воспалительным процессам системного характера, а при смещении генератора – требуется повторное хирургическое вмешательство [15].

Именно поэтому в последнее десятилетие наиболее распространенным получил метод неинвазивной ЭССМ [16]. Данный метод значительно расширил возможности реабилитации пациентов с ПСМТ. Как пример, исследование, в котором 15 пациентам с хроническим периодом ПСМТ проводили ЧЭССМ во время вертикализации [17]. В работе сравнивали степень поддержки колена и разгибания в тазобедренном суставе при помощи инструктора в отсутствие стимуляции и те же параметры у пациентов при ее наличии. Определено, что никто из испытуемых не мог стоять без ассистенции в отсутствие стимуляции. Со стимуляцией все участники могли поддерживать вертикальную позу с минимальной ассистенцией, а 7 пациентов стояли без какой-либо внешней поддержки коленного или тазобедренного суставов. Таким образом, люмбо-сакральные импульсы могут быть модулированы ЧЭССМ для увеличения степени самостоятельного поддержания вертикального положения у пациентов с хроническими двигательными и чувствительными нарушениями в результате ПСМТ.

Многочисленные исследования подтвердили эффективность совместного использования механотерапии и электростимуляции, превышающую пользу использования каждого из методов в отдельности. Например, в исследовании 2015 года применили комбинацию ЧЭССМ с беговой дорожкой у трех пациентов с неполным повреждением спинного мозга [18]. Частота стимуляции составляла 30 Гц, интенсивность подбиралась, исходя из появления покалывающих ощущений в дерматомах нижних конечностей. По результатам исследования выявлены изменения мышечной активации, кинематики ходьбы и снижение объема ассистенции пациентам для осуществления паттерна ходьбы. Самым постоянным параметром явилось увеличение угла сгибания в тазобедренном суставе на $11,3^\circ \pm 5,6^\circ$. Выводом явилось то, что ЧЭССМ является электрическим нейропротезом для осуществления двигательного контроля.

Другой вид стимуляции – функциональная электростимуляция (ФЭС) мышц конечностей, неоднократно доказывала свою эффективность. Так, раннее использование ФЭС в сочетании с роботизированной механотерапией на «Эриго» у больных с ишемическим инсультом [8], показало больший прирост мышечной силы в нижних конечностях, улучшение неврологических показателей, меньшее количество осложнений в остром периоде, выраженное увеличение активности моторной коры головного мозга по данным ТМС, увеличение амплитуды корковых ответов по сравнению с контрольной группой. Результаты применения ФЭС в сочетании с ходьбой в экзоскелете «ExoAtlet» у пациентов с ПСМТ показали незначительное уменьшение временных параметров, но значительное увеличение динамических параметров ходьбы, отмечено улучшением управления мышцами спины и мышцами-разгибателями тазобедренного сустава: ходьба пациентов основной группы стала более устойчивой в продольном и поперечном направлении и менее энергозатратной [9, 19]. В исследовании 2001–2012 годов, в котором проводилась инвазивная электростимуляция в сочетании с занятиями на комплексе «Локомот», выявлено увеличение скорости движения пациента в комплексе, выносливости, средней продолжительности дистанции, формирование паттерна замещения работы тренировочного комплекса на самостоятельную работу мышц пациента [20]. По завершении данного курса отмечено, что по сравнению с основной группой, эффективность реабилитации увеличилась в 1,5–2 раза.

Установлено, что для инициации локомоции у пациентов с ПСМТ необходимо воздействовать на определенный участок спинного мозга: на локомоторную зону, находящуюся в поясничном утолщении [21]. Поясничное утолщение простирается от уровня IX–X грудного позвонка до I поясничного, наибольшая ширина его соответствует уровню XII грудного позвонка. В исследованиях отмечено, что именно сгибание-разгибание ног можно вызвать и при постановке электродов выше этого уровня, но непосредственно шагоподобные движения вызываются в названной зоне. Установлено, что нет определенной частоты стимуляции, при которой у всех испытуемых можно вызвать шагоподобные движения, все параметры подбираются индивидуально и могут меняться в течение курса лечения. Стоит отметить, что ЧЭССМ, пришедшая взамен эпидуральной стимуляции, значительно уменьшает количество возможных осложнений, легче переносится пациентом. Однако, важно и то, что при ЧЭССМ необходимо значительно увеличивать величину импульса, с целью стимуляции именно корешков спинного мозга. В сравнении с эпидуральной стимуляцией, интенсивность ЧЭССМ возрастает примерно в 10 раз.

Установлено, что для инициации локомоции у пациентов с ПСМТ необходимо воздействовать на определенный участок спинного мозга: на локомоторную зону, находящуюся в поясничном утолщении [21]. Поясничное утолщение простирается от уровня IX–X грудного позвонка до I поясничного, наибольшая ширина его соответствует уровню XII грудного позвонка. В исследованиях отмечено, что именно сгибание-разгибание ног можно вызвать и при постановке электродов выше этого уровня, но непосредственно шагоподобные движения вызываются в названной зоне. Установлено, что нет определенной частоты стимуляции, при которой у всех испытуемых можно вызвать шагоподобные движения, все параметры подбираются индивидуально и могут меняться в течение курса лечения. Стоит отметить, что ЧЭССМ, пришедшая взамен эпидуральной стимуляции, значительно уменьшает количество возможных осложнений, легче переносится пациентом. Однако, важно и то, что при ЧЭССМ необходимо значительно увеличивать величину импульса, с целью стимуляции именно корешков спинного мозга. В сравнении с эпидуральной стимуляцией, интенсивность ЧЭССМ возрастает примерно в 10 раз.

Клиническое применение роботизированного комплекса для локомоторной терапии в безопорном состоянии с имитацией в том числе шагоподобных движений

В настоящий момент в клинике реабилитации ФГБУ «НМХЦ им. Н. И. Пирогова» Минздрава России проводится клиническая апробация роботизированного программно-аппаратного комплекса для локомоторной терапии в безопорном состоянии российского производства (рис. 1). Комплекс сочетает в себе применение роботизированной терапии и мультимодальной электростимуляции. Аппаратно-программный комплекс состоит из пяти модулей, от которых отходят тросы. К последним крепится подвешивающая система манжет. Пациент помещается в систему манжет в положении на животе. Манжеты фиксируются в области головы, верхних конечностей, груди, живота, таза, бедер и дистальных отделов голеней и голеностопных суставов. Движение пациента осуществляется за счет пневмокомпрессора и электрического при-

вода. Программой заложена имитация трех движений: плавания, ходьбы и прыжков (приседаний). Можно регулировать амплитуду движений, частоту, фазу, высоту положения участка тела в определенном модуле. Помимо пассивного режима, в котором все движения выполняет сам комплекс, есть ассистирующий режим. В указанном режиме можно изменять степень помощи комплекса. Так, например, уменьшая степень поддержки робота, увеличивается степень включения произвольных движений пациента по заданной траектории. Активные тренировки пациента на аппарате сочетаются с применением биологической обратной связи – игровой виртуальной среды, представленной в виде подводного мира.

Важно, что пациент занимается в условиях отсутствия осевой нагрузки на позвоночник, в связи с чем, противопоказаний у комплекса значительно меньше, чем у наиболее часто используемых роботизированных комплексов, что существенно расширяет область применения. К основным противопоказаниям относятся:

1. Острые состояния и обострение хронических состояний;
2. Грыжи передней поверхности тела, беременность;
3. При использовании виртуальной среды противопоказанием является повышенная эпилептическая активность;
4. Наличие цисто-, гастро-, трахеостом.

Комплекс находится на этапе клинического внедрения, однако, уже есть первые опубликованные работы. С сентября 2018 года по апрель 2019 года было проведено исследование, целью которого было определить клиническую эффективность роботизированного программно-аппаратного комплекса для локомоторной терапии в безопорном состоянии с одновременным использованием биологической обратной связи на основе виртуальной реальности с визуализацией образов в процессе физической реабилитации детей с ДЦП [22]. В исследовании участвовали мальчики (n=16) со спастической диплегией в возрасте 7–9 лет, разделённые на две группы: экспериментальную (ЭГ) и контрольную (КГ) – по 8 детей в каждой. В ЭГ занятия проводили на роботизированном программно-аппаратном комплексе для локомоторной терапии в безопорном состоянии с БОС в среде виртуальной реальности 2 раза в неделю, по 40 мин в течение 8 месяцев. Во время тренировки пациент находится в подвешенном горизонтальном положении и, используя специальные очки, смотрит на экран. В условиях имитации состояния погружения в морскую среду, при понижении гравитационных воздействий, дети выполняют двигательные задания в игровой форме: ищут сокровища, соревнуются с дельфинами и т.д. Дети КГ посещали традиционные занятия лечебной гимнастики. Измерение двигательных возможностей детей с ДЦП проводили с помощью комплекса двигательных тестов, позволяющих определить состояние опорно-двигательного аппарата и мышечной системы:

1. оценка статической выносливости мышц спины. Удержание головы из положения «лежа» на спине. Результат в секундах;
2. оценка скоростно-силовой выносливости мышц брюшного пресса. Подъем туловища из положения «лежа» на спине. Результат в количестве повторений;
3. оценка скоростно-силовой выносливости мышц рук. Поочередное сгибание и разгибание рук по 10 раз, сгибание пальцев в колечко, касаясь большим пальцем поочередно концевой фаланги каждого пальца, образуя «колечко». Результат в секундах;

4. оценка скоростно-силовой выносливости мышц ног. Поочередный подъем ног со сгибанием в коленном суставе. Оценка в секундах.

Результаты исследования показали, что у ЭГ в 1,3–1,5 раза возросли двигательные возможности. Значительно увеличились показатели силы и выносливости мышц верхнего плечевого пояса и нижних конечностей. Силовая выносливость мышц спины и живота в ЭГ возросла в 1,9 раза, повысилась адаптация к двигательным нагрузкам, тогда как в КГ эти характеристики изменились незначительно. После занятий на тренажере с образной визуализацией возросла скорость движений в верхних конечностях, улучшилась мелкая моторика рук. Время выполнения теста в ЭГ сократилось на 5,8 с (29%), а в КГ на 0,3 с (1,5%). Улучшение мелкой моторики у детей с ДЦП свидетельствует о большей сбалансированности нейрофизиологических процессов корковых зон двигательного анализатора. Полученная положительная динамика в отношении двигательных возможностей пациентов с ДЦП свидетельствует об оптимизации нейрофизиологических процессов в корковых зонах двигательного анализатора, повышении адаптации к двигательным нагрузкам и, как следствие, об эффективности реабилитации с включением роботизированного тренажера с БОС в среде виртуальной реальности и использованием технологии визуализации образов.

Настоящее наблюдение в клинике реабилитации ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России проводится на пациентах с позвоночно-спинномозговой травмой разных сроков давности, с уровнем травмы на шейном или грудном уровнях. Лечение всех пациентов носит комплексный характер, включает ежедневную индивидуальную лечебную гимнастику, циклическую пассивно-активную механотерапию, роботизированную терапию на устройствах с частичной осевой нагрузкой и физиотерапию со стимулирующей целью. Помимо перечисленных процедур к терапии добавлены занятия на роботизированном программно-аппаратном комплексе для локомоторной терапии в безопорном состоянии. В среднем, пациенты получают за курс от 7 до 10 процедур и занимаются 5 раз в неделю. Курс реабилитации составляет 15 дней. Одно занятие на роботизированном тренажере длится 30 минут, в течение которых чередуются различные двигательные профили (прыжки-плавание-ходьба). На первом занятии поочередно используется каждый двигательный профиль, оцениваются субъективные ощущения пациента, изменения мышечного тонуса при различных моделях движения, производится установка комфортных значений частоты и амплитуды. Таким образом, подбирается индивидуальный стартовый профиль под каждого пациента. Начиная со второго занятия, подключается мультимодальная электростимуляция – чрескожная электростимуляция спинного мозга (ЧЭССМ) и функциональная электростимуляция (ФЭС) мышц нижних конечностей и живота (рис. 2). Программное обеспечение комплекса позволяет синхронизировать до 16 каналов ФЭС и до 5 каналов ЧЭССМ с движениями в комплексе. Вручную устанавливаются частота, продолжительность импульса в каждом канале. Для спинальной стимуляции используется электростимулятор «BioStim-5», для периферической – мионейростимулятор «МНС 16–02». Электроды для ЧЭССМ накладываются следующим образом: в предпологаемую зону поясничного утолщения (Th12-L1) по малому прямоугольному активному электроду по правой и левой паравертебральным линиям, пассивные – в проекции

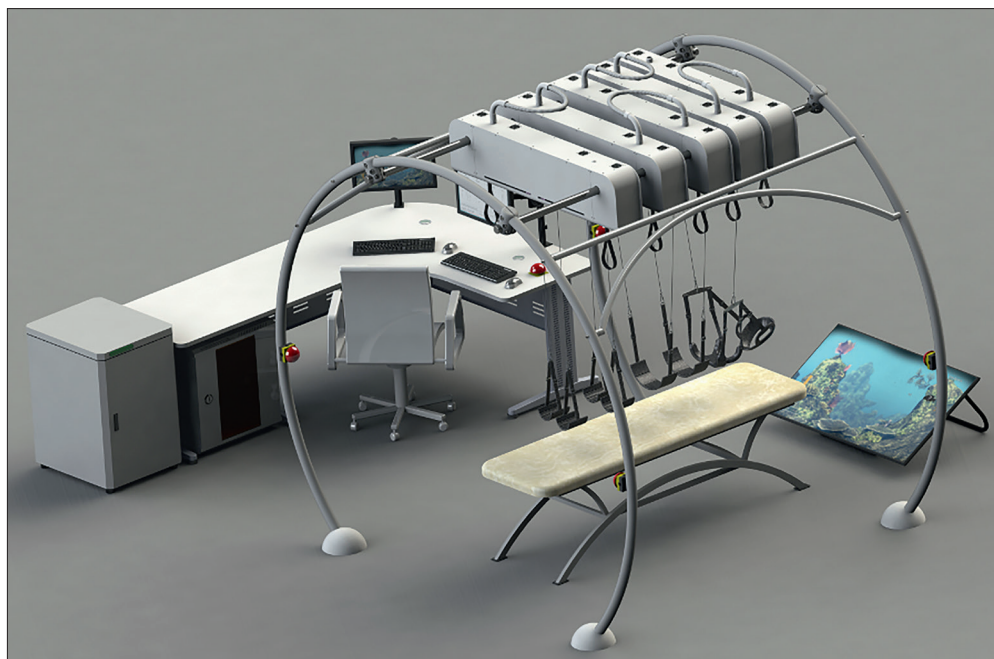


Рис. 1. Внешний вид комплекса роботизированного программно-аппаратного комплекса для локомоторной терапии в безопорном состоянии Крисаф

Fig. 1. Device for robotic locomotor therapy in horizontal unsupported state Krisaf

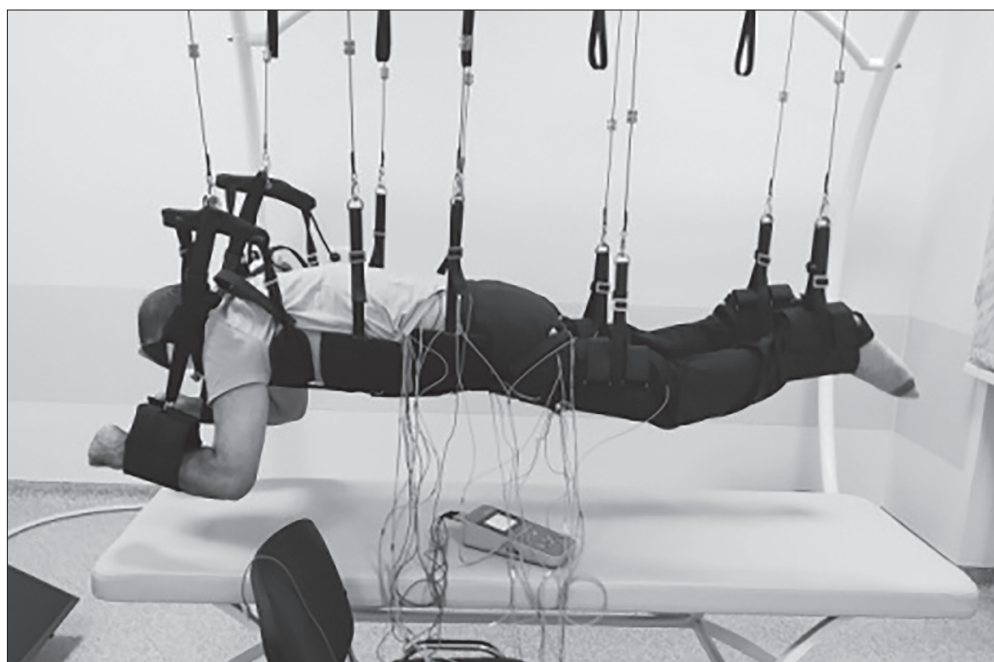


Рис. 2. Пациент занимается на роботизированном программно-аппаратном комплексе для локомоторной терапии в безопорном состоянии с синхронизированной мультимодальной электростимуляцией

Fig. 2. Training on the device for robotic locomotor therapy in horizontal unsupported state synchronized with multimodal electrostimulation

подвздошных гребней, а также средние прямоугольные электроды в зону проекции средних и больших ягодичных мышц. Сила тока устанавливается в пределах 120–160 мА, частота 10 кГц, длительность импульса 0,1–0,9 мс. Электроды для ФЭС у большинства пациентов устанавливаются на четырехглавые мышцы бедра по передней поверхности, на двуглавую и полусухожильную мышцы – по задней. Сила тока устанавливается в пределах 30–80 мА, частота 65 Гц, длительность импульса 0,1 мс. Параметры силы всегда устанавливаются исходя из двух критериев: при наличии чувствительности – до болевого порога, при её отсутствии – до видимых мышечных сокращений.

Перед курсом занятий и по их завершении, проводится оценка по следующим шкалам и параметрам:

1. Степень нарушения проводимости спинного мозга оценивается с помощью шкалы повреждения спинного мозга, разработанной Американской ассоциацией спинальной травмы – ASIA.

2. Мышечная сила оценивается по шестибальной шкале – Medical Research Council Scale.
3. Мышечный тонус исследуется с использованием Модифицированной шкалы спастичности Эшворт – Modified Ashworth Scale of Muscle Spasticity.
4. С помощью 3D-сенсоров определяется объем движений в позвоночнике из исходного положения на спине и на животе; объем движений в тазу из исходного положения на спине и фиксированными нижними конечностями, согнутыми в коленных суставах; при наличии активных движений в нижних конечностях измеряется объем движений в них.
5. Проводятся измерения окружности бедер, голени, грудной клетки, таза.

Перед началом процедуры, во время и после у пациентов измеряются пульс (уд/мин) и артериальное давление (мм.рт.ст.). Стоит обозначить, что снижение показателей артериального давления у пациентов с ПСМТ –

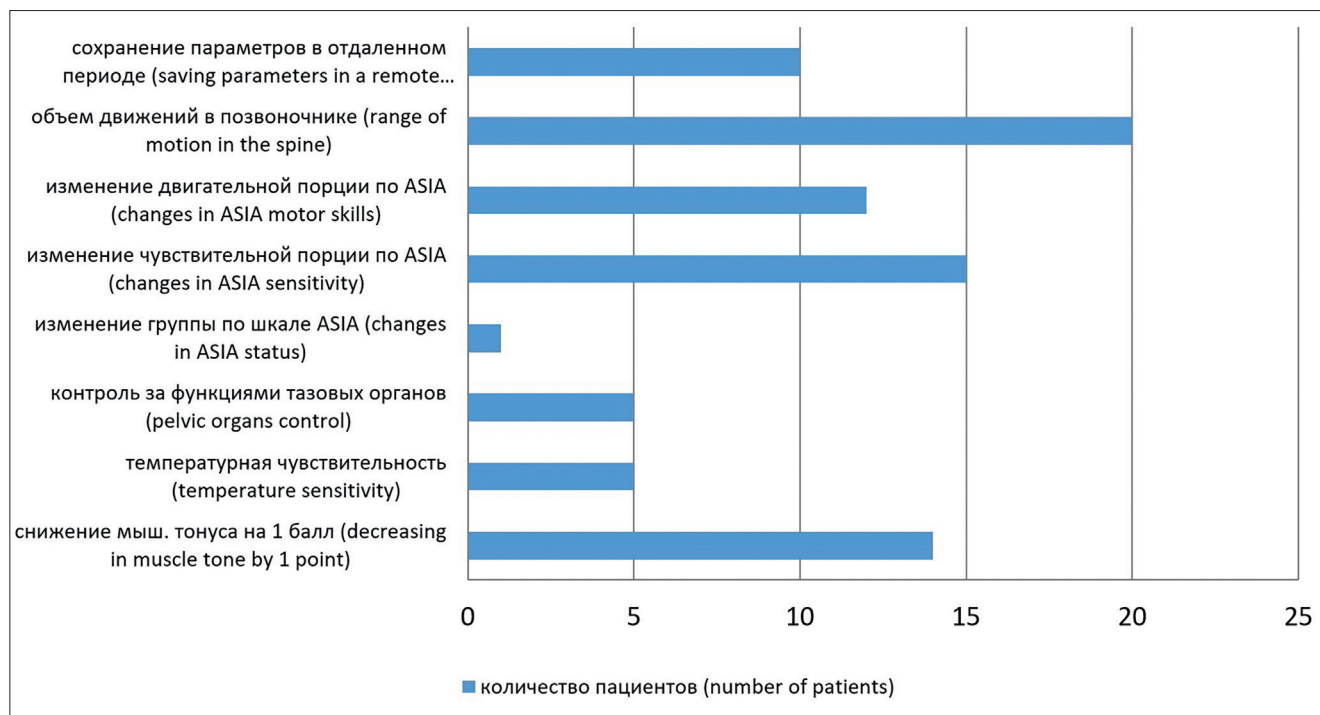


Рис. 3. Изменение параметров по окончании курс реабилитации
Fig. 3. Parameters at the end of the rehabilitation course

закономерный процесс. Показатели центральной гемодинамики у пациентов до прохождения курса и по завершении оставались в пределах допустимых значений. Так, показатели САД до занятий были 112–128 мм. рт. ст., после – 105–122 мм. рт. ст., показатели ДАД до занятий – 62–94 мм. рт. ст., после – 54–86 мм. рт. ст. Во время занятий ни у кого не было зафиксировано значимого изменения АД. САД не превышало 132 мм.рт.ст. и не опускалось ниже исходного уровня более чем на 10% от исходного, ДАД не поднималось выше 100 мм. рт. ст. и также не опускалось ниже исходного уровня более чем на 5%. ЧСС у пациентов во время занятий поднималась $\max = 112$ уд/мин, что соответствует нормальному приросту в ответ на умеренную физическую нагрузку. Во время прохождения курса занятий в комплексе не определялись воспалительные изменения по лабораторным данным, отсутствовали кожные или суставные воспалительные проявления. У пациентов, занимавшихся свыше 40 мин в течение 15–20 минут после занятия отмечалось легкое головокружение. Это вызвано тем, что были установлены высокие показатели амплитуды и частота колебаний была выше 0,80 Гц., т.е. движения были быстрыми и размашистыми, в связи с чем происходило укачивание. Такое состояние было зафиксировано у двух испытуемых, у которых анамнестически отмечена склонность к укачиванию.

На данном этапе исследования, к февралю 2020 года, курс занятий прошли 25 пациентов. У пятнадцати из них – шейный уровень ПСМТ, у десяти – грудной. Во время занятий установлено, что комфортная частота движения у пациентов находится в промежутке от 45 до 80 Гц. Несмотря на то, что возможности большинства пациентов позволяют заниматься только в пассивном режиме, цель занятия для всех – максимально активно быть вовлеченными в процесс тренировки, содружественно с роботом выполнять заданные движения. Пациенты отмечают, что при частоте ниже 45 Гц заниматься некомфортно, приходится прикладывать больше усилий, происходит

быстрое мышечное истощение, в связи с чем уменьшаются время и эффективность занятия. При частоте 70 Гц и выше в режиме ходьбы испытуемые отмечают произвольное включение мышц в работу. На фоне стимуляции отмечается облегчение в осуществлении движений. Следует отметить, что у пациентов с уровнем спастичности по шкале Эшворт 3–4 балла на фоне стимуляции увеличивается тонус в мышцах нижних конечностей. Однако, это корректируется установкой небольших значений частоты и амплитуды движений на первых занятиях, с постепенным их увеличением по мере прохождения курса. К 3–4 занятию пациенты с уровнем спастичности 3 балла и более адаптируются к скорости и амплитуде движений быстрее, чем на первой процедуре. Так, у больных с оценкой по шкале Эшворт 3 балла на первом занятии резкая флексия нижних конечностей в ответ на изменение движения сохранялась до 5–6 минут, а к 5 занятию адаптация занимала не более 1 минуты. При небольших исходных значениях стимуляции мышечный тонус снижается, движения происходят в полном объеме, пациент не испытывает дискомфорта.

В среднем, на 5–6 занятии пациенты начинали отмечать изменения. Наиболее часто это выражалось в уменьшении спастичности, в среднем, на 1 балл по шкале Эшворт, возможности произвольного напряжения мышц спины. У пяти пациентов улучшилась температурная чувствительность в конечностях особенно на низкие температуры (прикосновение холодного металла), расширилась зона чувствительности. У двадцати пациентов, полностью прошедших курс, по его завершении увеличился объем движений в исследуемых зонах, особенно в позвоночнике, в исходных положениях на спине и животе, что в том числе является косвенным свидетельством укрепления мышц корпуса. Например, пациент 3. с уровнем травмы Th7–8, прошел 10 занятий в комплексе с применением мультимодальной стимуляции. В итоге, объем движений в сравнении с начальным изменился следующим образом: подъем корпуса в исходном поло-

жении на спине – увеличение с 23° до 40°, объем движений в тазу в исходном положении на спине – с 35° до 98°, объем движений в правом тазобедренном суставе в исходном положении на спине – с 11° до 14°, объем движений в левом тазобедренном суставе в исходном положении на спине – с 32° до 62°. По шкале ASIA у пятнадцати пациентов отмечалось увеличение баллов по тактильной чувствительности, у двенадцати – увеличение балльной оценки двигательной активности. Например, лучший результат зафиксирован у пациента Я. с первоначальной степенью тяжести по ASIA A – с полным перерывом спинного мозга. По прохождении 8 занятий появилась болевая чувствительность в аногенитальной области, появилась возможность произвольного сокращения ануса, что расценивается по шкале как значимое улучшение состояния, т.к. аногенитальная область иннервируется S4-S5 корешками и появление в ней чувствительности и произвольных движений свидетельствует о неполном перерыве спинного мозга. У пятерых пациентов по окончании курса отмечалось улучшение контроля за функциями тазовых органов – дефекацией, микцией, способности удерживать мочу.

У десятих пациентов, поступивших на повторный курс реабилитации через 3 месяца, было отмечено сохранение параметров, которые были зафиксированы в предыдущую госпитализацию (рис. 1).

Уже на данном этапе можно установить, что занятия на роботизированном программно-аппаратном комплексе для локомоторной терапии в безопорном состоянии с синхронизированным проведением мультимодальной электростимуляции у пациентов с ПСМТ имеют клиническую ценность и эффективность. Кроме того, у роботизированного программно-аппаратного комплекса для локомоторной терапии в безопорном состоянии имеется ряд преимуществ:

Занятия проводятся в безопорном состоянии, в условиях отсутствия осевой нагрузки на позвоночник. Это может быть преимуществом, когда осевая нагрузка противопоказана.

1. Занятия можно начать в ранние сроки реабилитации после травмы. Во время занятий не отмечалось возникновения ортостатических реакций.

2. Пациентам с ампутированной нижней конечностью занятия не противопоказаны. В этом случае оператором отключаются тросы, находящиеся ниже уровня ампутации, и вес пациента распределяется с учетом этого.
3. Деформация позвоночника не является противопоказанием.
4. Выраженная спастичность не останавливает работу комплекса.
5. Возможность проводить одновременно синхронизированную ЧЭССМ и ФЭС.

Заключение

Таким образом, по данным иностранных и российских исследований, можно сделать вывод о том, что применение и включение в реабилитационные программы роботизированной механотерапии с имитацией шагоподобных движений, неоспоримо имеет свои преимущества. В свою очередь, электростимуляция как самостоятельный метод реабилитации и синхронизированная с тренировками на механизированных устройствах, дает возможность получить большую клиническую эффективность у неврологических больных. В результате курсового синхронизированного применения у пациентов с ПСМТ роботизированного имитирующего шагоподобные движения безопорного комплекса, ЧЭССМ и ФЭС, получены позитивные результаты, что свидетельствует об их безопасности и клинической эффективности. Кроме того, комплекс обладает более широким спектром применения за счет меньшего числа противопоказаний. В дальнейшем использование роботизированного программно-аппаратного комплекса для локомоторной терапии в безопорном состоянии в сочетании с мультимодальной стимуляцией может быть рассмотрено как один из основных методов реабилитации пациентов с ПСМТ. Однако, требуется проведение дальнейших исследований в этом направлении.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошонкина Т.Р., Мусиенко П.Е., Богачева И.Н. и др. Регуляция локомоторной активности при помощи эпидуральной и чрескожной электростимуляции у животных и человека. Ульяновский медико-биологический журнал. 2012; (3): 129–137.
2. Икоева Г.А., Никитюк И.Е., Кившенко О.И. и др. Клинико-неврологическая и нейрофизиологическая оценка эффективности двигательной реабилитации у детей с церебральным параличом при использовании роботизированной механотерапии и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2016; Т. 4 (4): 47–55. DOI:10.17816/PTORS4447–55
3. Шапкова Е.Ю. Вызванная спинальная локомоторная активность у человека: дис... к.м.н. Санкт-Петербург. 2005: 191 с.
4. Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н. Роботизированные устройства в нейрореабилитации: состояние вопроса. Вестник восстановительной медицины. 2018; 2 (84): 94–104.
5. Даминов В.Д., Ткаченко П.В., Карпов О.Э. Использование экзоскелета в комплексной реабилитации пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой. Вестник восстановительной медицины. 2017; (2): 126–132.
6. Бушков Ф.А., Клещунов С.С., Косяева С.В., Бжилянский М.А., Иванов Г.Е., Шаталова О.Г. Клиническое исследование применения экзоскелета «EXOATLET» у спинальных пациентов. Вестник восстановительной медицины. 2017; 2 (78): 90–100.
7. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. Москва. 2012: 496 с.
8. Солодякин Е.Е., Бурмистров А.Л., Бондарева Е.А., Мозоль В.В. Нейромышечная активация с применением подвесных систем в реабилитации пациентов. Международные обзоры: клиническая практика и здоровье. 2014; Т. 11 (5): 54–59.
9. Карпов О.Э., Ветшев П.С., Даминов В.Д., Ткаченко П.В. Клиническая практика применения экзоскелетов. Вестник восстановительной медицины. 2017; (4): 22–28.
10. Даминов В.Д. Совершенствование системы технологий роботизированной механотерапии в реабилитации больных с поражением центральной нервной системы: дис... д.м.н. Москва. 2013: 259 с.
11. Уварова О.А. Синхронизированное применение функциональной электростимуляции в роботизированной механотерапии у пациентов в остром периоде ишемического инсульта: дис... к.м.н. Москва. 2014: 122 с.
12. Ткаченко П.В. Реконструкция ходьбы с применением экзоскелета в реабилитации больных с последствиями травмы спинного мозга: дис... к.м.н. Москва. 2018: 123 с.
13. Ткаченко П.В., Даминов В.Д., Карпов О.Э. Синхронизированное применение экзоскелета с функциональной электростимуляцией у пациентов с последствиями травмы спинного мозга. Вестник восстановительной медицины. 2018; (3): 123–130.

14. Карякин Н.Н., Белова А.Н., Сушин В.О., Шейко Г.Е., Израелян Ю.А., Литвинова Н.Ю. Потенциальные преимущества и ограничения использования, роботизированных экзоскелетов у пациентов, перенесших позвоночно-спинномозговую травму: состояние вопроса. Вестник восстановительной медицины. 2020; 96 (2): 68–78. DOI:10.38025/2078–1962–2020–96–2–68–78
15. Pinter M. M., Gerstenbrand F., Dimitrijevic M. R. Epidural electrical stimulation of posterior structures of the human lumbosacral cord: 3. Control of spasticity. *Spinal Cord*. 2000; (38): 524–531.
16. Dimitrijevic M. R., Gerasimenko Y., Pinter M. M. Evidence for a spinal central pattern generator in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1998; (860): 360–376.
17. Minassian K., Jilge B., Rattay F., Pinter M. M., Binder H., Gerstenbrand F. Stepping-like movements in humans with complete spinal cord injury induced by epidural stimulation of the lumbar cord: electromyographic study of compound muscle action potentials. *Spinal Cord*. 2004; (42): 401–416.
18. Minassian K., Persy I., Rattay F., Pinter M. M., Kern H., Dimitrijevic M. R. Human lumbar cord circuitries can be activated by extrinsic tonic input to generate locomotor-like activity. *Human Movement Science*. 2007; (26): 275–295.
19. Winfried Mayr, Matthias Krenn, Milan R. Dimitrijevic. Epidural and transcutaneous spinal electrical stimulation for restoration of movement after incomplete and complete spinal cord injury. *Current Opinion in Neurology*. 2016; 29 (6): 721–726. DOI:10.1097/WCO.0000000000000382
20. Sayenko D. G., Rath M., Ferguson A. R. et al. Self-Assisted Standing Enabled by Non-Invasive Spinal Stimulation after Spinal Cord Injury. *Journal of Neurotrauma*. 2019; 36 (9): 1435–1450. DOI:10.1089/neu.2018.5956
21. Hofstoetter U. S., Krenn M., Danner S. M. et al. Augmentation of Voluntary Locomotor Activity by Transcutaneous Spinal Cord Stimulation in Motor-Incomplete Spinal Cord-Injured Individuals. *Journal of Artificial Organs*. 2015; 39 (10): E176-E186. DOI:10.1111/aor.12615
22. Мещерягина И.А., Рябых С.О., Россик О.С. Применение прямой электростимуляции и механотерапии на программном комплексе «Локомат» у больных с неврологическим дефицитом. Бюллетень восточно-сибирского научного центра сибирского отделения российской академии медицинских наук. 2013; 93 (5): 64–68.
23. Горелик В.В., Филиппова С.Н., Беляев В.С., Карлова Е.В. Эффективность тренажерной технологии визуализации образов в игровой деятельности для двигательной реабилитации детей с детским церебральным параличом. Вестник РГМУ. 2019; 8 (4): 39–46. DOI:10.24075/brsmu.2019.051

REFERENCES

1. Moshonkina T. R., Musienko P. E., Bogacheva I. N. et al. Regulaciya lokomotornoj aktivnosti pri pomoshchi epidural'noj i chreskoznoy elektrostimulyacii u zhivotnyh i cheloveka [Regulation of locomotor activity by epidural and transcutaneous electrical spinal cord stimulation in the human and animals]. *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. 2012; (3): 129–137 (In Russ.).
2. Ikoeva G. A., Nikityuk I. E., Kivoenko O. I. et al. Kliniko-nevrologicheskaya i nejrofiziologicheskaya ocenka effektivnosti dvigatel'noj reabilitacii u detej s cerebral'nym paralichom pri ispol'zovanii robotizirovannoj mekhanoterapii i chreskoznoy elektricheskoy stimulyacii spinnogo mozga [Clinical, neurological and neurophysiological assessment of the effectiveness of motor rehabilitation in children with cerebral palsy using robotic mechanotherapy and percutaneous electrical stimulation of the spinal cord]. *Pediatric traumatology, orthopaedic and reconstructive surgery*. 2016; 4 (4): 47–55. DOI: 10.17816/PTORS4447–55 (In Russ.).
3. Shapkova E. Yu. *Vyzvannaja spinal'naja lokomotornaja aktivnost' u cheloveka*. Kand, Diss. [Human-induced spinal locomotor activity. Cand, Diss]. Saint-Petersburg. 2005: 191 p. (In Russ.).
4. Belova A. N., Borzikov V. V., Kuznetsov A. N., Rukina N. N. Robotizirovannyye ustroystva v neyrorabilitatsii: sostoyaniye voprosa [Robotic devices in neurorehabilitation: state of the art]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2018; 2 (84): 94–104 (In Russ.).
5. Daminov V. D., Tkachenko P. V., Karpov O. E. Ispol'zovaniye ekzoskeleta v kompleksnoy reabilitatsii patsiyentov s pozvonочно-spinnomozgovoy travmoy [The use of exoskeleton in the comprehensive rehabilitation of patients with spinal cord injury]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2017; (2): 126–132 (In Russ.).
6. Bushkov F. A., Kleshchunov S. S., Kosyayeva S. V., Bzhilyanskiy M. A., Ivanova G. Ye., Shatalova O. G. Klinicheskoye issledovaniye primeneniya ekzoskeleta «EXOATLET» u spinal'nykh patsiyentov [A clinical study of the use of exoskeleton «EXOATLET» in spinal patients]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2017; 2 (78): 90–100 (In Russ.).
7. Bernshtein N. A. *Fiziologiya dvizhenii i aktivnost'*. [Physiology of movements and activity]. Moscow. 2012: 496 p. (In Russ.).
8. Solodyankin E. E., Burmistrov A. L., Bondareva E. A., Mozol V. V. Neyromyshechnaya aktivatsiya s primeneniye podvesnykh sistem v reabilitatsii patsiyentov. [Neuromuscular activation using suspension systems in the rehabilitation of patients]. *International reviews: clinical practice and health*. 2014; 11 (5): 54–59 (In Russ.).
9. Karpov O. E., Vetshev P. S., Daminov V. D., Tkachenko P. V. Klinicheskaya praktika primeneniya ekzoskeletov. [Clinical practice of exoskeletons]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2017; (4): 22–28 (In Russ.).
10. Daminov V. D. *Sovershenstvovaniye sistemy tekhnologiy robotizirovannoy mekhanoterapii v reabilitatsii bol'nykh s porazheniyem tsentral'noy nervnoy sistemy*. Dokt. Diss. [Improving the robotic mechanotherapy technology system in the rehabilitation of patients with central nervous system damage. Doct. Diss]. Moscow. 2013: 259 p. (In Russ.).
11. Uvarova O. A., *Sinkhronizirovannoe primeneniye funktsional'noy elektrostimulyatsii v robotizirovannoy mekhanoterapii u patsiyentov v ostrom periode ishemicheskogo insulta*. Kand, Diss. [The synchronized application of functional electrical stimulation in robotic mechanotherapy in patients with acute ischemic stroke. Cand, Diss.]. Moscow. 2014 (In Russ.).
12. Tkachenko P. V., *Rekonstruktsiya khodby s primeneniye ekzoskeleta v reabilitatsii bol'nykh s posledstviyami travmy spinnogo mozga*. Kand, Diss. [Reconstruction of walking using an exoskeleton in the rehabilitation of the spinal cord injury patients. Cand, Diss.]. Moscow. 2018: 123 p. (In Russ.).
13. Tkachenko P. V., Daminov V. D., Karpov O. E. Sinkhronizirovannoye primeneniya ekzoskeleta s funktsional'noy elektrostimulyatsiyey u patsiyentov s posledstviyami travmy spinnogo mozga. [Synchronized use of exoskeleton with functional electrical stimulation in patients with consequences of spinal cord injury]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2018; (3): 123–130 (In Russ.).
14. Karjakin N. N., Belova A. N., Sushin V. O., Sheiko G. E., Israeljan Y. A., Litvinova N. Y. Potencial'nye preimushchestva i ogranicheniya ispol'zovaniya, robotizirovannykh ekzoskeletov u pacientov, perenneshih pozvonочно-spinnomozgovuyu travmu: sostoyanie voprosa [Potential benefits and limitations of robotic exoskeleton usage in patients with spinal cord injury: a review]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2020; 96 (2): 68–78. DOI:10.38025/2078–1962–2020–96–2–68–78 (In Russ.).
15. Pinter M. M., Gerstenbrand F., Dimitrijevic M. R. Epidural electrical stimulation of posterior structures of the human lumbosacral cord: 3. Control of spasticity. *Spinal Cord*. 2000; (38): 524–531.
16. Dimitrijevic M. R., Gerasimenko Y., Pinter M. M. Evidence for a spinal central pattern generator in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1998; (860): 360–376.
17. Minassian K., Jilge B., Rattay F., Pinter M. M., Binder H., Gerstenbrand F. Stepping-like movements in humans with complete spinal cord injury induced by epidural stimulation of the lumbar cord: electromyographic study of compound muscle action potentials. *Spinal Cord*. 2004; (42): 401–416.
18. Minassian K., Persy I., Rattay F., Pinter M. M., Kern H., Dimitrijevic M. R. Human lumbar cord circuitries can be activated by extrinsic tonic input to generate locomotor-like activity. *Human Movement Science*. 2007; (26): 275–295.
19. Winfried Mayr, Matthias Krenn, Milan R. Dimitrijevic. Epidural and transcutaneous spinal electrical stimulation for restoration of movement after incomplete and complete spinal cord injury. *Current Opinion in Neurology*. 2016; 29 (6): 721–726. DOI:10.1097/WCO.0000000000000382
20. Sayenko D. G., Rath M., Ferguson A. R. et al. Self-Assisted Standing Enabled by Non-Invasive Spinal Stimulation after Spinal Cord Injury. *Journal of Neurotrauma*. 2019; 36 (9): 1435–1450. DOI:10.1089/neu.2018.5956
21. Hofstoetter U. S., Krenn M., Danner S. M. et al. Augmentation of Voluntary Locomotor Activity by Transcutaneous Spinal Cord Stimulation in Motor-Incomplete Spinal Cord-Injured Individuals. *Journal of Artificial Organs*. 2015; 39 (10): E176-E186. DOI:10.1111/aor.12615

22. Meshcheriagina I.A., Riabykh S.O., Rossik O.S. Primeneniye pryamoy elektrostimulyatsii i mekhanoterapii na programmnom komplekse «Lokomat» u bol'nykh s nevrologicheskimi defitsitami. [Use of direct electrical stimulation and mechanotherapy on "Lokomat" complex in patients with neurologic deficit]. *Acta Biomedica Scientifica*. 2013; 93 (5): 64–68 (In Russ.).
23. Gorelik V.V., Filippova S.N., Belyaev V.S., Karlova E.V. Effektivnost' trenazhernoy tekhnologii vizualizatsii obrazov v igrovoy deyatel'nosti dlya dvigatel'noy reabilitatsii detey s detskim tserebral'nym paralichom. [Efficiency of image visualization simulator technology for physical rehabilitation of children with cerebral palsy]. *Bulletin of RSMU*. 2019; 8 (4): 39–46. DOI:10.24075/brsmu.2019.051 (In Russ.).

Информация об авторах:

Даминов Вадим Дамирович, доктор медицинских наук, руководитель Клиники медицинской реабилитации, Национальный медико-хирургический центр имени Н.И. Пирогова Минздрава России, e-mail: daminov07@mail.ru

Ткаченко Полина Владимировна, кандидат медицинских наук, заведующий отделением медицинской реабилитации пациентов с нарушением функции периферической нервной системы и опорно-двигательного аппарата, Национальный медико-хирургический центр имени Н.И. Пирогова Минздрава России, e-mail: p.nikitchenko@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1672-9405>

Низаметдинова Анастасия Адэлевна, ординатор кафедры медицинской реабилитации и восстановительного лечения ИУВ, Национальный медико-хирургический центр имени Н.И. Пирогова Минздрава России, e-mail: courage689@gmail.com

Information about the authors:

Vadim D. Daminov, Dr. Sci. (Med.), Chief of Medical Rehabilitation Clinic, Pirogov Russian National Research Medical University, e-mail: daminov07@mail.ru

Polina V. Tkachenko, Dr. Sci. (Med.), Head of the Medical Rehabilitation Department for Patients with Impaired Peripheral Nervous System and Musculoskeletal System, Pirogov Russian National Research Medical University, e-mail: p.nikitchenko@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1672-9405>

Anastasiia A. Nizametdinova, Intern of Rehabilitation Medicine Chair, Institute of Postgraduate Medical Education, Pirogov Russian National Research Medical University, e-mail: courage689@gmail.com

