

ПЕРСПЕКТИВЫ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ В ВОССТАНОВЛЕНИИ ПАЦИЕНТОВ ПОСЛЕ ТРАВМЫ СПИННОГО МОЗГА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Карева Н.П.^{1,2}, Шелякина О.В.³, Павлова Е.В.³

¹ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России, Новосибирск, e-mail: knpnsk@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «НГМУ» Минздрава России, Новосибирск;

³АНО «Клиника НИИТО», Новосибирск, e-mail: oshelyakina@niito.ru

Позвоночно-спинномозговая травма является одной из основных причин инвалидности в молодом и зрелом возрасте. Основным доступным техническим средством, обеспечивающим возможность самостоятельного передвижения пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы, является кресло-коляска. Появление в конце XX века роботизированных комплексов обозначило качественно новые возможности реабилитации. С целью изучения мирового опыта проведения реабилитации с использованием современной робототехники пациентам, перенесшим позвоночно-спинномозговую травму, проведен анализ литературы. Развитие антропоморфной робототехники привело к созданию экзоскелета – устройства, повторяющего биомеханику человека и увеличивающего его физическую силу за счет внешнего каркаса. Клинические испытания, проведенные за рубежом и в России, доказали целесообразность использования экзоскелета для реабилитации пациентов в восстановительный и поздний периоды позвоночно-спинномозговой травмы. Тренировки в экзоскелете от 30 до 60 мин от 3 до 6 раз в неделю повышают функциональную мобильность, уменьшают спастичность и болевой синдром, положительно влияют на качество жизни. В отдельных исследованиях сообщается об улучшении функции тазовых органов. Полученные результаты актуализируют задачу создания эффективного экзоскелета для дистанционной реабилитации в домашних условиях и абилитации пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой в ежедневной жизни.

Ключевые слова: позвоночно-спинномозговая травма, парализация, реабилитация, экзоскелет, роботизированная кинезотерапия.

THE PROSPECTS OF ANTHROPOMORPHIC ROBOTICS IN REHABILITATION OF PATIENTS AFTER SPINAL CORD INJURY (REVIEW)

Kareva N.P.^{1,2}, Shelyakina O.V.³, Pavlova E.V.³

¹Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics n.a. Ya.L.Tsivyayn, Novosibirsk, e-mail: knpnsk@mail.ru;

²Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk;

³ANO «Clinic NIITO», Novosibirsk, e-mail: oshelyakina@niito.ru

Spinal cord injury is one of the main causes of disability in young and adulthood. A wheelchair is the main available technical tool for rehabilitation. It provides the possibility of independent movement of patients with the effects of spinal cord injury. The robotic complexes came about in the 20th century. Its appearance marked a qualitatively new rehabilitation possibilities. In order to study the global experience of rehabilitation with the use of modern robotics for patients who have undergone a spinal injury, an analysis of the literature has been carried out. The development of anthropomorphic robotics led to the creation of an exoskeleton. The device repeats human biomechanics and increases its physical strength at the expense of the external frame. Clinical trials conducted abroad and in Russia have proved the feasibility of using an exoskeleton to rehabilitate patients with lost motor function in recovery of Spinal cord injury. Exoskeleton training was carried out for 30 minutes to 60 min. 3 to 6 times a week. Using exoskeleton increases functional mobility, reduces of spasticity and pain, and improves the quality of life. Some studies report an improvement in the function of the pelvic organs. The obtained results explain relevance of creating an effective exoskeleton for distance rehabilitation at home and habilitating patients with spinal cord injury in daily life.

Keywords: spinal cord injury, rehabilitation, paraplegia, exoskeleton, mechanotherapy.

Позвоночно-спинномозговая травма (ПСМТ) является одной из основных причин инвалидности в молодом и зрелом возрасте вследствие потери двигательной функции нижних конечностей. Социальное значение ПСМТ определяется высокой летальностью (17-23% в остром периоде травмы), а также тяжелыми и стойкими последствиями, приводящими

к I и II группе инвалидности в 70-80% случаев [1].

Основным техническим средством, обеспечивающим возможность самостоятельного передвижения пациентов с последствиями спинальной травмы, является кресло-коляска. Современное кресло-коляска активного типа позволяет человеку относительно свободно перемещаться по адаптированным жилым помещениям, на рабочем месте, быть достаточно самостоятельным в быту, участвовать в некоторых социальных и развлекательных мероприятиях и даже заниматься спортом. Однако отсутствие доступной среды на многих городских и сельских объектах дорожной и социальной инфраструктуры приводит к ограничениям передвижения в инвалидной коляске. Кроме того, при длительном пребывании в инвалидном кресле отсутствует адекватная нагрузка на нижние конечности и создаются условия для формирования контрактур в крупных суставах [2; 3]. Использование инвалидного кресла-коляски в качестве технического средства передвижения сопровождается повышенной нагрузкой на плечевой пояс, что является причиной возникновения болевых миофасциальных синдромов и сосудистых нарушений в верхних конечностях более чем у 70% инвалидов [4]. Данные обстоятельства, как и недостаточный уровень навыков пользования креслом-коляской, влияют на степень адаптации пациентов с нарушением двигательной функции к этому техническому средству. В результате, несмотря на достаточно высокую обеспеченность инвалидными колясками, более половины инвалидов с выраженными ограничениями к передвижению не способны самостоятельно покидать пределы дома [5; 6].

Цель исследования: изучение мирового опыта проведения реабилитации пациентам, перенесшим ПСМТ, с использованием современной робототехники.

Появление в конце XX века роботизированных комплексов, позволяющих создать по заданным программам физиологический алгоритм движений туловища и конечностей обездвиженного вследствие травмы или заболевания пациента, обозначило качественно новые возможности реабилитации [7]. Наиболее известным и исследованным роботизированным комплексом для локомоторной терапии является аппарат «Локомат» (производитель Hocoma AG, Швейцария), относящийся к группе стационарных ассистирующих роботов. Благодаря наличию двигателей в ортезах, закрепленных на латеральной поверхности бедра и голени пациента, во время тренировки на аппарате воспроизводится физиологический паттерн ходьбы даже у лиц с полной потерей функции нижних конечностей. Система биологической обратной связи позволяет оценить особенности ходьбы пациента на беговой дорожке аппарата и при необходимости регулировать скорость и характер движений. Степень участия самого пациента в двигательном акте оценивается посредством заложенных в программном обеспечении

инструментов обратной связи и после компьютерной обработки визуализируется на мониторе, что мотивирует пациента к более высокому уровню вовлеченности в тренировочный процесс. История применения роботизированной системы «Локомат» в реабилитации пациентов с нарушением функции ходьбы насчитывает более 15 лет. За этот период были выявлены основные эффекты локомоторной терапии с помощью ассистирующих роботов. К настоящему времени доказано, что тренировки на «Локомате» или аналогах способствуют увеличению силы и массы мышц, участвующих в движении, более быстрому и качественному восстановлению двигательного стереотипа ходьбы, повышению функциональной мобильности пациентов с патологией центральной нервной системы [8-10]. Обязательным условием эффективности тренировок является их применение в комплексе с электромиостимуляцией, традиционными формами лечебной физкультуры и другими методами реабилитации [11-13]. Наряду с роботизированной системой «Локомат» в последние годы используются роботы-аналоги Walkbot (производитель P&S Mechanics Co., Корея) и отечественная система для локомоторной терапии «СЛТ», которые применяются для реабилитации как взрослых пациентов, так и детей.

К недостаткам стационарных ассистирующих роботов относится невозможность проведения тренировок на неподвижной поверхности без систем разгрузки веса, отсутствие мобильности и проведения дистанционной реабилитации в условиях естественной для пациента среды [14].

Развитие антропоморфной робототехники в XXI веке привело к созданию экзоскелета – устройства, повторяющего биомеханику человека и увеличивающего его физическую силу за счет внешнего каркаса. История разработки экзоскелетов насчитывает более полувека, но первые модели для реального применения вначале для нужд армии, а затем и медицины появились лишь в нулевые годы третьего тысячелетия [15].

За последнее десятилетие разработано несколько видов экзоскелетов, основным предназначением которых является медицинская и социальная реабилитация лиц с утратой двигательной функции конечностей. Все медицинские экзоскелеты для восстановления способности к передвижению представляют собой аппаратно-программные комплексы (АПК), состоящие из механической конструкции, повторяющей контуры нижних конечностей и имеющей в своем составе двигателя для обеспечения движения, и процессора для регистрации телеметрических данных во время тренировки и формирования сигналов управления на основе анализа этих данных. Как правило, существует два способа управления системой АПК: с помощью электронного планшета, находящегося в руках инструктора, и при помощи рукоятки с пультом управления на самом экзоскелете или встроенным в костыли, используемые пациентом [15; 16]. Экзоскелеты разных производителей, отличаясь

особенностями конструкции и программного обеспечения, обеспечивают возможность вертикализации пациента, ходьбы по ровной поверхности и, при определенных навыках, подъема и спуска по лестнице [17; 18].

До недавнего времени основными причинами, ограничивающими широкое использование этих антропоморфных роботизированных устройств, были недостатки технической конструкции, в частности большой вес, несовершенство программного обеспечения в части дистанционного управления, высокая стоимость и малое количество клинических испытаний, оценивающих безопасность и эффективность использования экзоскелета, что особенно важно. В последние 5-7 лет ситуация стала меняться. Проведены клинические испытания, в том числе и мультицентровые, экзоскелетов ReWalk (производитель ARGO Medical Technologies, Израиль), REX (производитель REX Bionics, Новая Зеландия), HAL (производитель Cyberdyne, Япония), Ekso (производитель Ekso Bionics, США) [19-21] и первого российского экзоскелета «ЭкзоАтлет» (производитель ООО «ЭкзоАтлет») [22]. В данных исследованиях была доказана безопасность и возможность применения антропоморфных роботов для реабилитации лиц с последствиями спинальной травмы с полным и неполным повреждением спинного мозга в восстановительный и поздний периоды течения болезни. Авторы определили перечень противопоказаний к тренировкам в экзоскелете с целью повышения безопасности и профилактики вероятных осложнений, таких как падение с риском переломов, повреждение кожных покровов, колебания артериального давления. К числу противопоказаний, помимо тяжелой сопутствующей патологии, когнитивных расстройств, нарушений функции верхних конечностей, были отнесены трофические нарушения кожных покровов в местах крепления экзоскелета, факт переломов в течение последних лет, сгибательные контрактуры тазобедренных и коленных суставов и некоторые другие состояния, препятствующие проведению тренировок. В выводах, сделанных по результатам исследований эффективности и безопасности тренировок в экзоскелете, подчеркивается, что при правильном отборе пациентов риск развития осложнений существенно снижается, а возможность восстановить функцию ходьбы с помощью робота, хоть и на короткое время, мотивирует больного на активное участие в реабилитационном процессе [19; 23].

К наиболее значимым последствиям и осложнениям, определяющим качество жизни пациентов, перенесших ПСМТ, относятся, помимо двигательного дефицита, расстройства функции тазовых органов, спастичность, хронический болевой синдром, контрактуры. Начиная с 2013-2014 гг. основной целью исследований реабилитационных тренировок с использованием экзоскелета является изучение влияния ходьбы в работе на функцию центральной нервной системы и клинические проявления последствий позвоночно-

спинномозговой травмы. Так, Sczesny-Kaiser et al. (2015) в исследовании с экзоскелетом HAL показали, что под влиянием тренировок продолжительностью 30 мин 5 дней в неделю в течение трех месяцев происходит не только улучшение функциональной мобильности пациентов, но и индуцируется нейрональная пластичность в первичной соматосенсорной коре. В исследование были включены 11 пациентов с неполным повреждением спинного мозга на уровне T8 и ниже, среднее время после травмы – $8,8 \pm 2,1$ года [24]. В нескольких исследованиях изучалось влияние ходьбы в экзоскелете на спастичность и выраженность болевого синдрома у лиц с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. Все исследователи отмечают снижение спастичности и уменьшение интенсивности болевого синдрома в ходе тренировок независимо от модели экзоскелета – использовались зарубежные экзоскелеты HAL, ReWalk и российский ЭкзоАтлет [22; 25; 26]. Следует отметить, что в некоторых исследованиях тренировки проводились в комбинации с электронейростимуляцией. Для оценки вклада каждого из реабилитационных мероприятий в изменение мышечного тонуса необходимы дополнительные исследования с рандомизацией групп наблюдения [27].

Более глубокий анализ влияния тренировок в экзоскелете на основные проявления и осложнения ПСМТ выполнен Baunsgaard C.V. et al. (2018) по результатам одного из первых проспективных многоцентровых исследований клинического применения роботов. Клинические испытания с использованием экзоскелета Ekso GT, в которые были вовлечены 52 участника, проводились по единому протоколу в 9 реабилитационных неврологических центрах, расположенных в 7 европейских странах [28]. В результате получены достоверные данные о снижении высокого мышечного тонуса непосредственно после 30 минут тренировки на период до нескольких часов, что в итоге привело к уменьшению степени спастичности мышц к моменту окончания 8-недельного периода испытаний по отношению к периоду до их начала ($p < 0,001$). Однако этот эффект не был длительным, что, по мнению авторов, может служить основанием для исследования возможности пролонгированного применения экзоскелета в программах лечения и профилактики спастичности у лиц с последствиями ПСМТ. Также было установлено, что ходьба в экзоскелете способствует уменьшению спастической и нейропатической боли, но данный эффект был краткосрочным и проявлялся только в период тренировок. Впервые авторами была проведена оценка изменения функциональной независимости пациента в процессе реабилитации с помощью версии III шкалы SCIM и показано, что в результате тренировок достоверно возросла способность к самообслуживанию, мобильность, уменьшились симптомы, связанные с недержанием стула. Не было выявлено изменений функции мочевого пузыря, расстройства которой имелись у всех пациентов. Тренировки в экзоскелете не оказали существенного

влияния на качество жизни у пациентов с давностью травмы до года, тогда как у пациентов со сроком травмы более года повысилась собственная оценка своих способностей к адаптации к окружающей среде. Авторы отмечают, что в результате исследования доказаны хорошая переносимость тренировок, их положительное влияние на состояние лиц с последствиями ПСМТ, однако разработке рекомендаций по применению экзоскелета на основании полученных данных препятствует ограниченное число участников испытаний, отсутствие группы контроля, остается неизученным вопрос интенсификации параметров тренировки.

К отрицательным последствиям ПСМТ относится вынужденная гиподинамия и связанные с ней риски ожирения и сердечно-сосудистой патологии [29]. В исследовании Gorgey S.A. et al. (2017) установлено, что у лиц с избыточным весом тренировки в экзоскелете не менее 3 раз в неделю на протяжении 15 недель приводят в среднем к потере 6 килограмм. В тренировках участвовали пациенты с полным повреждением спинного мозга на уровне Th4 и ниже. Противопоказанием к проведению реабилитационных тренировок с помощью современных моделей экзоскелетов является вес пациента более 100 кг, что ограничивает число лиц для использования данной технологии [30]. Ожидается, что в результате повышения физической активности и функциональной мобильности на фоне тренировок в экзоскелете может замедляться потеря костной ткани ниже уровня спинальной травмы. Однако низкая плотность костной ткани бедра и голени существенно повышает риск перелома нижней конечности у лиц с параплегией, на сегодняшний день тяжелый остеопороз в этой области (критерий $T < -3,5$ по данным денситометрии) служит противопоказанием к применению экзоскелета. Для расширенного включения лиц с остеопорозом в тренировочный процесс необходимы дальнейшие исследования по обоснованию параметров тренировки (скорость и длина шага, высота подъема конечности, степень разгрузки, продолжительность сеанса) с учетом состояния костной ткани [31].

Во всех исследованиях, результаты которых послужили материалом для написания данной статьи, испытания проводились на моделях экзоскелета, требующих использования дополнительной опоры в виде поручней или костылей. Таким образом, участниками клинических исследований могли быть только пациенты с уровнем травмы не выше C7-C8 с сохраненной функцией верхних конечностей. Особенностью многоцентрового исследования «RAPPER II», выполнявшегося в реабилитационных центрах Великобритании, Австралии и Новой Зеландии, является вовлечение в число участников лиц с тетраплегией вследствие травмы на высоком уровне (C4-C5) [32]. Использовался экзоскелет REX Bionics, конструктивные особенности которого позволяют осуществлять вертикализацию и обучение ходьбе даже при утрате двигательной функции верхних конечностей. В первой части

исследования, в которую были вовлечены 20 участников с тетраплегией (25%) и параплегией (75%), была показана безопасность и возможность тренировок в экзоскелете независимо от уровня и степени ПСМТ. К окончанию периода тренировок 19 из 20 участников могли выполнить в среднем за 313 секунд следующие действия: подъем с места, ходьба вперед на три метра, поворот, ходьба назад и возвращение в сидячее положение. Для выполнения задания 15 человекам требовался один помощник, четверем – два помощника. Авторы подчеркивают, что данное исследование является первым систематизированным клиническим испытанием возможностей экзоскелета REX Bionics с достаточно большим числом участников. Следующие этапы исследования, в которые будут вовлечены еще 80 человек, должны дать ответы на такие актуальные вопросы, как степень эффективности тренировок у лиц с полным и неполным повреждением спинного мозга на разных уровнях, выбор интенсивности тренировок и характера упражнений в зависимости от состояния пациента.

Актуальность дальнейших исследований клинического применения экзоскелетов возросла с появлением на рынке реабилитационного оборудования моделей, предназначенных для индивидуального использования самим пациентом в домашних условиях с помощью обученного оператора [33]. По мнению многих авторов, достижения в области разработки и развития антропоморфной робототехники требуют активизации медицинских исследований, направленных на создание обоснованной технологии и клинических рекомендаций по использованию экзоскелетов в стационарных и амбулаторных условиях [17; 28; 31].

Заключение

Таким образом, анализ клинических исследований, выполненных в России и за рубежом, позволяет сделать заключение о целесообразности использования экзоскелета для реабилитации больных в восстановительный и поздний периоды позвоночно-спинномозговой травмы. К безусловным преимуществам тренировки в экзоскелете относится возможность вертикализации и имитации самостоятельной ходьбы после длительного пребывания в инвалидной коляске, активация и укрепление костно-мышечного аппарата, улучшение психоэмоционального состояния пациента, в то же время обязательное участие ассистента в тренировочном процессе ограничивает использование медицинского роботизированного комплекса вне медицинской организации. Актуальной задачей настоящего времени является разработка экзоскелетов с расширением возможности их применения для дистанционной реабилитации на дому и абилитации инвалидов в повседневной жизни. Усовершенствованию экзоскелета должны помочь расширенные клинические исследования, направленные на разработку научно обоснованной, безопасной и

эффективной технологии использования роботизированного АПК под наблюдением специалиста и самим пациентом в амбулаторных условиях.

Список литературы

1. Морозов И.Н., Млявых С.Г. Эпидемиология позвоночно-спинномозговой травмы: обзор // Медицинский альманах. 2011. № 4 (17). С. 157-159.
2. Guidance on the safe use of wheelchairs and vehicle-mounted passenger lifts. Medical Device Agency. Device Bulletin. 2003. Vol 3. P. 22.
3. Sapey B., Stewart J., Donaldson G. The Social implications of Increases in wheelchair use. Report by Department of Applied Social Science Lancaster University. Lancaster. 2004. P. 113.
4. Степанов А.А., Буренина И.А. Медицинское сопровождение бытовой и трудовой адаптации инвалидов с двигательными нарушениями // Вертеброневрология. 2005. Т. 12. № 1-2. С. 63-66.
5. Васильченко Е.М., Кислова А.С., Золоев П.К. Организационно-методические аспекты адаптации к креслу-коляске инвалидов с ограничением способности к передвижению // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2013. № 2. С. 53-56.
6. Пузин С.Н., Шургая М.А., Шкурко М.А., Красномясова И.А., Христофоров С.Н., Меметов С.С. Аспекты реабилитации инвалидов пожилого возраста в российской федерации // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2016. Т. 19. № 3. С. 116-122.
7. George Hornby T, Campbell Donielle D., Zemon David H., Kahn Jennifer H. Clinical and quantitative evaluation of robotic-assisted treadmill walking to retrain ambulation after spinal cord injury. Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation. 2005. Vol. 11. no. 2. P.1–17.
8. Tefertiller C., Pharo B., Evans N., Winchester P. Efficacy of rehabilitation robotics for walking training in neurological disorders: a review. J. Rehabil Res Dev. 2011. Vol. 48. no. 4 P. 387–416.
9. Knikou M. Functional reorganization of soleus H-reflex modulation during stepping after robotic-assisted step training in people with complete and incomplete spinal cord injury. Exp Brain Res. 2013. Vol. 228. no. 3. P. 279–96.
10. Ki Yeun Nam, Hyun Jung Kim, Bum Sun Kwon, Jin-Woo Park, Ho Jun Lee, Aeri Yoo Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2017. Vol. 14. P. 24.
11. Мещерягина И.А., Рябых С.О., Россик О.С. Применение прямой электростимуляции и механотерапии на программном комплексе «Локомат» у больных с неврологическим

дефицитом. Бюллетень ФСНЦ СО РАМН. 2013. № 5 (93). С. 64-68.

12. Полилова Ю.В., Дробышев В.А., Гецман Я.А., Шелякина О.В. Отдалённые результаты включения роботизированной механотерапии и транскраниальной магнитостимуляции в восстановительное лечение последствий спинальной травмы // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=24243> (дата обращения: 14.11.2018).

13. Krishnan C., Kotsapouikis D., Dhaher Y.Y., Rymer W.Z. Reducing robotic guidance during robot-assisted gait training improves gait function: a case report on a stroke survivor. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2013. Vol. 94 no. 6. P. 1202-6.

14. Hidler J., Nichols D., Pelliccio M., Brady K., Campbell D.D., Jennifer H. Kahn, Hornby T.G. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke. Neurorehabil Neural Repair. 2009. Vol. 23. no 1. P. 5–13.

15. Хурс С.П., Вережкин А.А. Состояние и тенденции развития антропоморфной робототехники // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 4. С 25-52.

16. ЭкзоАтлет – российский экзоскелет. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exoatlet.ru> (дата обращения: 10.12.2018).

17. Даминов В.Д., Ткаченко П.В. Экзоскелеты в медицине: мировой опыт и клиническая практика Пироговского Центра // Вестник национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. 2017. Т. 12. № 4, часть 2. С. 17-22.

18. Morawietz C., Moffat F. Effects of locomotor training after incomplete spinal cord injury: a systematic review. Arch Phys Med Rehabil. 2013. Vol. 94. P. 2297–308.

19. Esquenazi A., Talaty M., Packel A., Saulino M. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. Am J Phys Med Rehabil. 2012. Vol. 91. P. 911–921.

20. Kolakowsky-Hayner S.A., Crew J., Moran S., Shah A. Safety and Feasibility of using the Ekso™ Bionic Exoskeleton to Aid Ambulation after Spinal Cord Injury. Journal of Spine. 2013. S4. 003.

21. Aach M., Cruciger O., Sczesny-Kaiser M., Höffken O., Meindl R.Ch., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Sankai Y., Schildhauer T.A. Voluntary driven exoskeleton as a new tool for rehabilitation in chronic spinal cord injury: a pilot study. Journal of Spine. 2014. Vol.14. no.12. P. 2847-53.

22. Даминов В.Д., Ткаченко П.В., Карпов О.Э. Использование экзоскелета в комплексной реабилитации пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой // Вестник восстановительной медицины. 2017. № 2. С.126-132.

23. Miller L.E., Zimmermann A.K., Herbert W.G. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Med Devices Auckl NZ*. 2016. Vol. 9. P.455–466.
24. Sczesny-Kaiser M., Höffken O., Aach M., Cruciger O., Grasmücke D., Meindl R., Schildhauer T.A., Schwenkreis P., Tegenthoff M. HAL exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2015. Vol. 12. P. 68.
25. Cruciger O, Schildhauer T.A., Meindl R.C., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Citak M. Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2016. Vol. 11. P 529–534.
26. Stampacchia G., Rustici A., Bigazzi S., Gerini A., Tombini T., Mazzoleni S. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons. *NeuroRehabilitation*. 2016. Vol. 39. P. 277–283.
27. Baunsgaard C.B., Vig Nissen U., Brust A.K., Frotzler A., Ribeill C., Kalke Y-B. Gait training after spinal cord injury: safety, feasibility and gait function following 8 weeks of training with the exoskeletons from Ekso Bionics. *Spinal Cord*. 2018. Vol. 56. P. 106–116.
28. Baunsgaard C.B., Vig Nissen U., Brust A.K., Frotzler A., Ribeill C., Kalke Y-B. León N., Gómez B., Samuelsson K., Antepohl W., Holmström U., Marklund N., Glott T., Opheim A., Penalva J.B., Murillo N., Nachtegaal J., Faber W., Biering-Sørensen F. Exoskeleton gait training after spinal cord injury: An exploratory study on secondary health conditions. *J Rehabil Med*. 2018. Vol. 50 no.9. P.806-813.
29. Cirnigliaro C.M., Myslinski M.J., La Fontaine M.F., Kirshblum S.C., Forrest G.F., Bauman W.A. Bone loss at the distal femur and proximal tibia in persons with spinal cord injury: imaging approaches, risk of fracture, and potential treatment options. *Osteoporos Int*. 2017. Vol. 28. P 745-765.
30. Gorgey A.S., Wade R., Sumrell R., Villadelgado L., Khalil R.E., Lavis T. Exoskeleton Training May Improve Level of Physical Activity After Spinal Cord Injury: A Case Series. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2017. Vol. 23. P 245-255.
31. Gorgey S.A. Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *World Journal of Orthopaedics*. 2018. Vol. 9. P 112-119.
32. Birch N., Graham J., Priestley T., Heywood C., Sakel M., Gall A., Nunn A., Signal N. Results of the first interim analysis of the RAPPER: trial in patients with spinal cord injury: ambulation and functional exercise programs in the REX powered walking aid. *J Neuroeng Rehabil* 2017. Vol. 14. P 60-70.

33. Rex Bionics Ltd. TM-06 v 1.0 REX P Instruction for Use ROW. Auckland, New Zealand. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rexbionics.com/rex-for-home-use//> (дата обращения: 12.12.2018).