

# ОБЗОРЫ. ЛЕКЦИИ. ДОКЛАДЫ. ИСТОРИЧЕСКИЕ ОЧЕРКИ

## REVIEWS. LECTURES. REPORT. HISTORICAL SKETCHES

DOI: 10.38025/ 2078-1962-2020-96-2-68-78

УДК: 616.8-009.1-085.851.8: 616.832

### ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ У ПАЦИЕНТОВ, ПЕРЕНЕСШИХ ПОЗВОНОЧНО-СПИННОМОЗГОВУЮ ТРАВМУ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Карякин Н.Н., Белова А.Н., Сушин В.О., Шейко Г.Е., Израелян Ю.А., Литвинова Н.Ю.

*Приволжский исследовательский медицинский университет Минздрава России, Нижний Новгород, Россия*

#### РЕЗЮМЕ

Восстановление двигательных функций у пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой (ПСМТ) является приоритетной задачей медицинской реабилитации данной категории больных. Несмотря на достижения современной медицины, уровень восстановления движений после травмы спинного мозга часто оказывается незначительным, многие больные остаются прикованными к инвалидной коляске. В результате низкой физической активности у пострадавших постепенно развиваются вторичные осложнения (остеопороз, ожирение, сердечно-сосудистые, дыхательные, мочеполовые, трофические и прочие нарушения), отягощающие течение основного заболевания и затрудняющие процесс медицинской реабилитации. Надежды врачей-реабилитологов и пациентов связаны с появлением роботизированных экзоскелетов (РЭС), которые могут стать инновационным средством улучшения мобильности больных с ПСМТ. Целью обзора является предоставление сведений о возможной пользе и недостатках использования РЭС в реабилитации пациентов с ПСМТ. В статье обсуждаются общие характеристики современных экзоскелетов и условия их использования для пациентов с парализацией нижних конечностей. Представлены сведения об эффективности и безопасности использования экзоскелетных устройств в нейрореабилитации, а также данные об ограничениях и проблемах, связанных с использованием экзоскелетов в клинической практике. Приведены результаты метаанализов и отдельных рандомизированных исследований, посвященных потенциальной пользе использования РЭС как в быту так в реабилитации пациентов с ПСМТ. Рассмотрено влияние тренировок ходьбы в экзоскелете на степень восстановления двигательных функций, уровень общей физической активности и массу тела пациентов с ПСМТ. В статье обращается внимание на нерешенные проблемы и перспективы дальнейших разработок РЭС для нужд пациентов с ПСМТ. Подчеркивается необходимость разработки стандартных протоколов и проведении крупных рандомизированных сравнительных клинических исследований с длительным периодом наблюдения пациентов с целью выяснения потенциала использования экзоскелетов.

**Ключевые слова:** нейрореабилитация, роботизированные устройства, экзоскелеты, позвоночно-спинномозговая травма, инвалид, парез

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.38025/ 2078-1962-2020-96-2-68-78>

# POTENTIAL BENEFITS AND LIMITATIONS OF ROBOTIC EXOSKELETON USAGE IN PATIENTS WITH SPINAL CORD INJURY: A REVIEW

Karjakin N.N., Belova A.N., Sushin V.O., Sheiko G.E., Israeljan Y.A., Litvinova N.Y.

Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

## ABSTRACT

Restoration of motor functions in patients with spinal cord injury (SCI) is a priority problem of this patient's category medical rehabilitation. Despite the achievements of modern medicine, the level of movement restoration after SCI is often insignificant, many patients stayed confined to a wheelchair. Secondary complications (osteoporosis, obesity, cardiovascular, respiratory, urogenital, trophic and other disorders) used to develop in the injured people as a result of low physical activity, they aggravate the course of the main disease and complicate the process of medical rehabilitation. A hope for rehabilitation specialist and patients is associated with the appearance of robotic exoskeletons (RES), that might become an innovation means for improving the mobility of patients with SCI. The purpose of the review is to provide information on the possible benefits and disadvantages of the use of RES in the rehabilitation of patients with SCI. This article discusses the general characteristics of modern exoskeletons and the conditions of their use for patients with paralysis of the lower extremities. The article presents Information on the effectiveness and safety of the use of exoskeleton devices in neurorehabilitation, as well as data on limitations and problems associated with exoskeleton use in clinical practice. The results of meta-analyses and randomized studies on the potential benefits of the RES usage both in everyday life and in rehabilitation of patients with SCI are presented. The influence of walking training in the exoskeleton on the degree of motor functions improvement, overall physical activity level and body weight in patients with SCI is highlighted. The article draws attention to the unsolved problems and further perspectives of RES application in patients with SCI. It emphasizes the necessity for protocols standardization and large randomized comparative clinical trials organization with prolonged observational period of patients in order to determine exoskeletons usage potential.

**Keywords:** neurorehabilitation, robotic devices, exoskeletons, spinal cord injury, invalid, paresis

**For citation:** Karjakin N.N., Belova A.N., Sushin V.O., Sheiko G.E., Israeljan Y.A., Litvinova N.Y. 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. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-96-2-68-78>

Позвоночно-спинномозговая травма (ПСМТ) возникает, как правило, у лиц молодого возраста и влечет за собой крайне тяжелые последствия для здоровья [1,2]. Восстановление двигательных функций после ПСМТ, в частности, способность к самостоятельному передвижению, является приоритетной задачей медицинской реабилитации этих пациентов [3,4]. Однако, несмотря на достижения современной медицины, уровень восстановления движений после травмы спинного мозга часто оказывается незначительным, многие больные остаются прикованными к инвалидной коляске [5]. Из-за постоянного пребывания в положениях сидя либо лежа значительно снижается физическая активность пострадавших и нарушается нормальное функционирование организма что, в свою очередь, приводит к многочисленным вторичным осложнениям (остеопороз, ожирение, сердечно-сосудистые, дыхательные, мочеполовые, трофические и прочие нарушения) [6]. Использование для вертикализации и ходьбы механизированных ортезов НКАФО (hip-knee-ankle-foot orthosis, англ.) и RGO (reciprocating gait orthosis, англ.) требует от пациентов с ПСМП значительных энергозатрат и поэтому имеет мало перспектив в клинической практике [7]. Надежды врачей-реабилитологов и пациентов связаны с появлением роботизированных экзоскелетов, которые могут стать инновационным средством улучшения мобильности больных с ПСМТ [2,7,8].

Экзоскелетом называют устройство, которое надевается на туловище или на конечность человека в виде внешнего каркаса и повторяет биомеханику его движений [9]. Термином «роботизированный» (синонимы – силовой, моторизированный) экзоскелет (РЭС) обозначают экзоскелет, способный увеличивать физические возмож-

ности человека в результате его оснащения двигателем и компьютеризированной системой управления (пневматическими либо гидравлическими приводами и рычагами) [10,11]. Бионические моторизированные экзоскелеты обеспечивают близкую к физиологической ходьбу человека с нижним парапарезом или параличом за счет перемещения его нижних конечностей в соответствии с паттерном реципрокных шаговых движений [12].

Возможно, РЭС станет тем полезным реабилитационным инструментом, который откроет новые возможности преодоления некоторых негативных последствий ПСМТ [13,14]. Однако в настоящее время широкому клиническому применению РЭС препятствует отсутствие неоспоримых доказательств эффективности их использования в реабилитации и высокая стоимость этих устройств [13].

Целью нашего обзора является предоставление сведений о возможной пользе и недостатках использования РЭС в реабилитации пациентов с ПСМТ.

## Общие характеристики современных роботизированных экзоскелетов для пациентов, перенесших позвоночно-спинномозговую травму

К настоящему времени существует достаточно много моделей медицинских РЭС, разработанных компаниями для пациентов с различными уровнями повреждения спинного мозга [11,10,15], все они являются экзоскелетами для нижних конечностей. К числу наиболее известных относятся экзоскелеты Ekso (Ekso Bionics), Indego (Parker Hannifin), Rewalk (ReWalk Robotics), Rex (REX Bionics), HAL (Cyberdyne), Axosuit (Axosuits), ExoAtlet (ЭкзоАтлет) [15,16]. Большая часть из них позволяет человеку с парезом или параличом нижних конечностей выполнять шаговые

движения и движения «сесть-встать», «встать-сесть»; некоторые (например, Rewalk) дают возможность подниматься и спускаться со ступеней лестницы. Далеко не все модели РЭС имеют разрешение на использование в качестве медицинского изделия. Так, в США в 2018 г. одобрение FDA на персональное использование получили лишь два бренда (Rewalk и Indego), на использование в качестве средства медицинской реабилитации – три бренда (Rewalk, Indego, Ekso) [13,12]. В странах Евросоюза для использования в качестве средства медицинской реабилитации одобрены экзоскелеты HAL и Rex, для персонального использования – Rex [12]. В нашей стране регистрационное удостоверение Росздравнадзора на медицинское изделие, позволяющее использовать РЭС в медицинской реабилитации, пока имеется только у отечественного экзоскелета ЭкзоАтлет [[https://nevacert.ru/files/med\\_reestr/12799.pdf](https://nevacert.ru/files/med_reestr/12799.pdf)].

Разработанные к настоящему времени устройства характеризуются большой массой (наиболее легкий, Indego, весит около 12 кг, наиболее тяжелый, Rex, около 38 кг), что затрудняет их самостоятельное одевание и снятие. При этом РЭС рассчитаны на лиц с определенным ростом и не очень большим весом тела, что также ограничивает потенциальный круг пользователей. Так, ограничения по массе тела пациента составляют для экзоскелетов Ekso, Rewalk, HAL и REX 100 кг, Indego – 113 кг, Axosuit – 125 кг; ограничения по росту для экзоскелетов Ekso, Rewalk, Indego составляют соответственно 152-193 см; 160-190 см; 150-190 см [12].

Для некоторых моделей экзоскелета имеются также ограничения по выраженности асимметрии нижних конечностей: так, использование Rewalk возможно лишь в случае, если разница по длине бедер составляет < 1.27 см, голени < 1.9 см. Для того, чтобы человек мог ходить в экзоскелете, у него должна быть сохранена возможность разгибания и сгибания в тазобедренном и коленных суставах: для ходьбы в Ekso должно быть сохранено билатеральное сгибание 110 градусов в тазобедренных суставах, а контрактуры в коленных суставах не должны ограничивать движения более чем на 12 градусов; для ходьбы в Rewalk должно быть сохранено разгибание в тазобедренном суставе и иметься почти полное разгибание ноги в коленном суставе (в положение лежа и стоя при нейтральном положении стопы угол отклонения от полного разгибания в коленном суставе не должен превышать 10 градусов). Наличие контрактур в суставах нижней конечности является тем ограничением, которое не позволяет многим пациентам с ПСМТ пользоваться РЭС [13].

Ходьба в РЭС требует присутствия рядом с пациентом и/или помощи специально обученного сопровождающего лица. Выделяют четыре уровня посторонней помощи лицам, использующим РЭС: максимальный (сопровождающий обеими руками удерживает поясничный ремень устройства и/или тело пациента, осуществляя почти постоянную, т.е. на протяжении более чем 66% времени, поддержку и помощь); умеренный (сопровождающий одной или двумя руками удерживает поясничный ремень устройства и/или тело пациента, периодически, т.е. на протяжении 35-65% времени, осуществляя поддержку и помощь); минимальный (сопровождающий одной рукой удерживает поясничный ремень устройства и/или тело пациента, изредка, т.е. на протяжении 35-65% времени осуществляя поддержку и помощь); близкий контакт/отсутствие помощи (контакт /речевые подсказки по требованию, помощь и поддержка на протяжении менее чем 5% времени) [17].

Скорость ходьбы в РЭС обычно небольшая; так, согласно данным одного из системных обзоров, средняя скорость ходьбы в экзоскелетах, рассчитанная по данным 84 пациентов с ПСМТ, составила 0,26 м/с (0,94 км/ч) [18]. Скорость ходьбы может варьировать от 0.2 до 0.7 м/сек (0,7-2,5 км/ч), в зависимости от модели устройства и физических возможностей пациента с ПСМТ [19]. Даже те модели, которые получили одобрение FDA для индивидуального пользования, непригодны для ходьбы по неровной либо мокрой (дождь, снег) поверхности [13].

#### **Условия использования экзоскелетов пациентами с ПСМТ**

Для большей части имеющихся на рынке моделей РЭС зарегистрированы показания и противопоказания к использованию устройства («критерии включения и исключения»), это сделано в целях обеспечения безопасности пользователей этих устройств. Руководства к каждой конкретной модели могут несколько различаться между собой, однако, в целом, все они учитывают уровень травмы спинного мозга, степень повреждения спинного мозга (полное/неполное поперечное поражение) и способность пользователя опираться на костыли или ходунки [12]. Как правило, общими противопоказаниями к использованию РЭС служат наличие в нижних конечностях трофических нарушений, гетеротопических оссификатов, неразрешившегося тромбоза глубоких вен; наличие у пациента когнитивных/психических расстройств, беременности, неконтролируемой вегетативной дизрефлексии [12].

В первую очередь, применение существующих моделей требует сохранности функции рук для обеспечения возможности самостоятельного управления устройством и/или опоры на ходунки/костыли при ходьбе (в н.в. лишь у экзоскелета REX имеются приводы, обеспечивающие стабильность вертикальной позы и равновесие пользователя, что позволяет не использовать при ходьбе вспомогательные приспособления [12]. Если пациент в силу отсутствия надежного схвата не способен инициировать ходьбу при помощи контроллера либо обеспечить надежную опору на костыли, то передвижение в РЭС для него будет невозможным или небезопасным. Поэтому одобрение FDA на практическое использование РЭС распространяется лишь на пациентов с определенным уровнем травмы спинного мозга. Например, для использования экзоскелетов Rewalk и Indego в реабилитации – уровни T4-T6, для практического применения этих устройств – уровни T7-L5 [21]. Ограничения по уровню травмы спинного мозга значительно суживают реабилитационные возможности РЭС, поскольку многие пострадавшие имеют ПСМТ на высшейшейшем уровне.

Управление экзоскелетом может оказаться проблематичным также в случае недостаточно высокого интеллектуального уровня пациента [13].

При решении вопроса о целесообразности использования РЭС у пациента с ПСМТ следует оценивать риск возможных осложнений. Так, до 60 % пациентов, перенесших ПСМТ, страдают остеопенией или остеопорозом; полагают, что, в отличие от инволютивного остеопороза, потеря костной массы при ПСМТ имеет другой, «нейрогенный», механизм [22]. Основная утрата костной ткани происходит в первые 12-24 месяца после ПСМТ, затем процессы костного ремоделирования и деминерализации постепенно стабилизируются [23]. Снижение плотности костной ткани бывает особенно выраженным в дис-

тальных отделах бедренной кости и в проксимальных отделах большеберцовой кости, что значительно повышает риск переломов соответствующей локализации [24], в том числе, при надевании тяжелого экзоскелета и при вставании в нем. Возможны также переломы дистального отдела большеберцовой и пяточной костей [23]. Поэтому всем пациентам-кандидатам на тренировки в РЭС настоятельно рекомендуют выполнять денситометрию коленных и тазобедренных суставов, а также рентгенографию голеностопного сустава. Если денситометрия тазобедренного сустава или шейки бедренной кости демонстрирует показатель Т-критерия менее 3.5 стандартных отклонений, пациента исключают из кандидатов на тренировки в экзоскелете [23].

70-75% пациентов с последствиями ПСМТ подвержены быстрому развитию трофических нарушений кожи и мягких тканей вследствие сдавления [25]. РЭС обычно снабжены фиксирующими и стабилизирующими приспособлениями, которые способны натирать кожу пациента и приводить к развитию трофических расстройств. Это следует учитывать при отборе пациентов для тренировок в экзоскелете. Современные РЭС снабжены датчиками давления, что позволяет мониторировать силу сдавления мягких тканей в местах контакта экзоскелета с телом человека и, таким образом, предупреждать развитие ишемии и некрозов [26].

Таким образом, ограничения использования РЭС у пациентов, перенесших ПСМТ, определяются, в первую очередь, соображениями безопасности. Перед тем, как использовать любой РЭС в медицинской реабилитации, пациент не только должен дать информированное согласие, но и пройти тщательный физикальный осмотр, необходимый для принятия решения о целесообразности и безопасности использования РЭС.

Следующий этап – индивидуальная настройка РЭС; для этого пациенту проводят ряд измерений в целях обеспечения удобства и безопасности пользования устройством (в частности, необходимо обеспечить стабильность ног в коленном суставе в фазу опоры и достаточный отрыв стопы от пола в фазу переноса) [27]. Как минимум, измеряют длину бедра от большого вертела до щели коленного сустава и длину голени от коленного сустава до пяточной кости. При настройке РЭС следует учитывать, что при измерениях у пациентов с ПСМТ может возникнуть необходимость учета таких факторов, как перекося таза, разница в относительной длине ног, атрофия мышц, повышенная ранимость кожных покровов и пр. На подгонку РЭС обычно требуется от 1 до 3-х сессий, стратегии настройки устройства у разных моделей могут существенно различаться [13].

На надевание РЭС обычно требуется от 10 до 60 минут, при этом, в целях соблюдения правил безопасности, одевание пациента обычно проводится строго согласно чек-листу, в котором перечислены все необходимые «шаги»; обучение пользованию РЭС также занимает обычно несколько сеансов [13].

#### **Доказательная база для оценки эффективности и безопасности экзоскелетов**

На сегодняшний день применение РЭС у пациентов с ПСМТ относится к сфере научных работ, проводимых в условиях исследовательских лабораторий или реабилитационных центров [2]. A.Gordey сообщает о том, что в 2018 г. в реестре клинических исследований, опубликованном на сайте [clinicaltrials.gov](http://clinicaltrials.gov), были перечислены 28 исследований, посвященных различным применениям РЭС

у пациентов с ПСМТ [13]. Основная часть исследований касается изучения конкретной модели РЭС и проводится на небольших по размеру выборках (на «сериях случаев») [3]. Мультицентровые исследования проводятся значительно реже и, как правило, ограничиваются пределами одной страны либо пределами стран Евросоюза (например, исследование экзоскелета Indego, проведенное в США и включившее 5 центров [28]; исследование экзоскелета Ekso, проведенное в 9 европейских центрах [4].

К настоящему времени опубликовано достаточно много обзоров и метаанализ исследований, посвященных потенциальной пользе использования РЭС как в быту (в качестве ассистирующих ходящих устройств), так и в реабилитации пациентов с ПСМТ [11,12,29]. Некоторые системные обзоры обобщают данные по использованию не только РЭС, но и роботизированных ортопедических устройств типа Lokomat [3].

Первый метаанализ научных работ по использованию РЭС у пациентов с ПСМТ принадлежит авторам из США и был опубликован ими в 2016 г [11]. L.Miller и соавторы изучили 105 публикаций на данную тему, имевшихся в библиографических базах данных MEDLINE и EMBASE, и, руководствуясь международными требованиями к системным обзорам [30], отобрали для последующего анализа 14 исследований [31-35]. Все эти исследования являлись проспективными и одноцентровыми, в сумме включали 111 пациентов (от 3 до 16 пациентов в каждом из центров); средний возраст больных составил 37 лет, 83% пострадавших составили мужчины, преобладал грудной уровень травмы спинного мозга, в ¾ случаев имело место полное поперечное поражение спинного мозга [11]. Для тренировок использовали экзоскелеты ReWalk [36-38], Ekso [4,5], а также Indego [27]. Продолжительность курса тренировок составляла от 1 до 24 недель. Занятия, как правило, проводились три раза в неделю, продолжительность занятий составляла от 60 до 120 минут; чаще пациентов обучали ходить по ровной поверхности, однако в некоторых исследованиях в тренировки включали ходьбу по лестнице, преодоление препятствий, задания на выполнение бытовых действий [32,38].

Совсем недавно был опубликован детальный анализ качества системных обзоров, касающихся клинической эффективности применения РЭС с целью улучшения ходьбы и мобильности пациентов с неврологической патологией, в том числе, с ПСМТ [29]. Авторы изучили 331 тезис, имевшихся в библиографических базах данных и содержащих соответствующие ключевые слова, выбрали для последующего анализа 109 полнотекстовых статей, и, после экспертной оценки содержания этих статей, отобрали 17 системных обзоров по данной теме. Авторы обнаружили, что методологический уровень этих обзоров и качество предоставления данных в преобладавшем числе случаев были низкими. Нередко недостаточно полно была представлена информация о пациентах (например, рост, масса тела, исходный уровень мобильности) и о протоколах тренировок (например, продолжительность занятий, число запланированных и реально выполненных тренировок); пациенты в первичных исследованиях, на анализе которых строился тот или иной обзор, иногда дублировались [29]. Общий вывод авторов этой работы неутешителен: в силу значительных методологических погрешностей опубликованных к настоящему времени системных обзоров, опираться на них при принятии решений о целесообразности клиническом использовании данной технологии надо с осторожностью [29].

### Эффективность использования РЭС лицами, перенесшими ПСМТ

РЭС у пациентов с ПСМТ используют, во-первых, как вспомогательные («ассистирующие») устройства, позволяющие пациенту с нижней параплегией ходить по квартире и даже за ее пределами [33,35,39], во-вторых, с реабилитационной целью (предотвращение вторичных осложнений обездвиженности и уменьшение времени пребывания в положении сидя) [4,13,39].

#### *РЭС как вспомогательные устройства для ходьбы*

В 2016 г. канадскими авторами был опубликован системный обзор по результатам 7 исследований, посвященных возможностям использования РЭС в качестве ассистирующего ходьбе устройства [2]. Пять из семи исследований касались изучения возможностей экзоскелета Rewalk [37,38,40]; одно – экзоскелета Indego [41], одно – роботизированного ортеза Mina [42]. Все эти исследования выполнялись в условиях лаборатории. В каждом из исследований принимали участие от одного до 12 пациентов с полным (чаще) или неполным (реже) поражением спинного мозга; давность ПСМТ варьировала от 1 года до 24 лет, преобладали мужчины. Задачи, которые ставили перед собой исследователи, были разными: оценить способность больных с поперечным поражением спинного мозга передвигаться в РЭС и выполнять рутинные движения, связанные с ходьбой [31]; определить необходимое число тренировок для обучения ходьбе в РЭС и степень посторонней помощи при вставании и ходьбе по лестнице [38]; изучить особенности кинематики движений у разных пациентов [37]; исследовать безопасность ходьбы в РЭС [36]; оценить стойкость достигнутых результатов (спустя месяц после завершения тренировок) [40]; сравнить скорость и дистанцию ходьбы в РЭС и в ортезе KAFO [41]. Все РЭС продемонстрировали свою эффективность: ходьба стала возможной для всех тех пациентов, которые до этого могли передвигаться только в инвалидной коляске [2]. Наиболее высокая скорость ходьбы (0.51 м/с) была достигнута при использовании экзоскелета Rewalk после 45 тренировок, каждая из которых продолжалась от 60 до 120 минут [38]. Большинство исследователей для оценки эффективности ходьбы в РЭС использовали стандартизированные тесты TUG (Timed Up and Go, или Время вставания и прохода), 10 MWT (Six-Minute Walk Test, или Тест шестиминутной ходьбы), 6 MWT (Ten-Meter Walk Test, или тест 10-метровой ходьбы) [43]. Согласно результатам тестирования, Rewalk оказался более эффективным у пациентов с повреждением спинного мозга на нижегрудном уровне в сравнении с больными, получившими травму на верхнегрудном уровне [36]. Экзоскелет Indego оказался более эффективным в отношении функциональной мобильности, чем нероботизированный ортез KAFO.

Представленные канадскими авторами данные согласуются с данными метаанализа, выполненного авторами из США: после курса тренировок в среднем 76% пациентов оказались способными ходить в РЭС без посторонней помощи; среднее расстояние, преодолеваемое за 6 минут (тест «6-минутная ходьба»), составило 98 метров [11]. Преимущества ходьбы пациентов с ПСМТ в РЭС в сравнении с ходьбой в механизированных ортезах НКАFO отмечают и другие исследователи [34].

Результаты многоцентровых исследований отдельных моделей РЭС, опубликованные в 2018 г., также подтверждают тот факт, что все пациенты с полным поперечным повреждением спинного мозга, ранее не ходившие, после серии тренировок способны научиться удерживать равновесие и ходить в экзоскелете [4,28].

Таким образом, представленные выше результаты служат предпосылками к тому, чтобы РЭС стали применяться как ассистирующие устройства, обеспечивающие возможность самостоятельной ходьбы пациентов по дому и за его пределами.

Однако мы не обнаружили ни одной публикации, в которой бы анализировалась эффективность применения РЭС не в лабораторных условиях, а в обычной среде, с позиций улучшения активностей повседневной жизни и качества жизни в целом. Использование РЭС в быту ограничено, в первую очередь, высокой стоимостью устройства (в среднем, 70-100 тыс. долларов США), во-вторых, необходимостью постоянного присутствия рядом с пациентом специально обученного сопровождающего лица, помогающего пациенту управлять устройством и удерживать равновесие, а также способного оказать помощь в случае падения [13]. Кроме того, практическое использование РЭС ограничено наличием многочисленных барьеров, связанных с окружающей средой (бортики, наклонные и неровные поверхности, ступени и пр.). Конструкция некоторых РЭС (например, ReWalk, REX, Indego) позволяет преодолевать ступени лестницы, однако это требует существенной помощи со стороны сопровождающего лица [44]. С практической точки зрения, пациенту с ПСМТ удобнее использовать для передвижения инвалидную коляску, чем РЭС, поскольку коляска способна развигать аналогичную скорость (около 0.5 м/с) [45] и при этом лишена неудобств, свойственных РЭС. Еще одним ограничением является то, что продолжительность непрерывной работы аккумуляторов РЭС ограничена всего несколькими часами (ReWalk – 8 ч, Indego и Ekso – 4 ч., REX – 2 ч) [12].

Вероятно, РЭС смогут стать для пациентов с ПСМТ практически значимыми средствами передвижения в случае дальнейших технологических доработок, которые позволят сделать ходьбу в них безопасной, независимой от посторонней помощи и достигающей скорости ходьбы здоровых лиц, а также тогда, когда для этих лиц обществом будет создана безбарьерная окружающая среда [12].

#### *РЭС как средства реабилитации пациентов с ПСМТ*

Польза РЭС для пациентов с ПСМТ рассматривается большей частью исследователей не только с позиции расширения их мобильности в быту, но и с точки зрения реабилитационного воздействия ходьбы в экзоскелете.

Доказано, что пребывание больного в естественном для организма вертикальном положении уменьшает риски развития контрактур в суставах ног, снижения плотности костной ткани, спастичности и отеков в нижних конечностях, в особенности, если вертикализировать пациента начинают уже в раннем периоде после ПСМТ [46]. В сравнении с ортезами и другими системами фиксации пациента в положении стоя, РЭС является более физиологичным средством обеспечения вертикальной поддержки и ходьбы пациента [12].

Поэтому вполне обосновано оптимистичное мнение о том, что РЭС, используемые в качестве средств медицинской реабилитации, обладают потенциалом к улучшению двигательных функций и паттернов ходьбы пациентов с неполным повреждением спинного мозга, а также способствуют повышению общего уровня физической активности и предупреждению вторичных осложнений, таких, как ожирение, остеопороз, нейрогенные нарушения функции тазовых органов [7,47,48].

### *Влияние ходьбы в экзоскелете на двигательные функции пациентов с ПСМТ*

Благоприятное воздействие ходьбы в экзоскелете на функцию нижних конечностей рассматривают преимущественно с позиций профилактики контрактур (вследствие поддержания функционального объема движений в суставах ног) и с позиций воздействия на спастичность. Согласно данным метаанализа, выполненного L.Miller и соавторами [11], уменьшение спастичности в мышцах ног после тренировок в РЭС отметили 38% пациентов (95% ДИ: 19%-59%) [31,39]. Однако данные о позитивном влиянии тренировок в экзоскелете на спастичность основаны лишь на описании отдельных случаев либо серий случаев [49].

Кроме того, в отличие от ходьбы в механизированных ортезах, ходьба в РЭС, возможно, ускоряет естественное восстановление нарушенных после ПСМТ функций [13]. Полагают, что у пациентов с неполным повреждением спинного мозга многократно повторяемые функциональные движения, который совершает шагающий в экзоскелете человек, может стимулировать пластичность проводящих двигательных путей, способствуя истинному восстановлению движений в ногах [7,49,50]. При этом эффективность тренировок, вероятно, зависит от давности травмы. Так, среди 52 участников мультицентрового исследования, в котором тренировки ходьбы в экзоскелете Ekso проводились трижды в неделю на протяжении 8 недель, увеличение Балла двигательных функций нижних конечностей (Lower Extremity Motor Score) наблюдалось лишь у пациентов с давностью ПСМТ менее 1 года; в то же время выполнение функциональных тестов TUG и 10MWT стало достоверно лучше у пациентов как с острой, так и с хронической ПСМТ [4]. Трехмесячные тренировки ходьбы в экзоскелете HAL также способствовали приросту Балла двигательных функций нижних конечностей [49]. Однако отсутствие групп сравнения не дает возможность понять, за счет каких факторов произошло это улучшение (спонтанное восстановление, возможное в ранний период после ПСМТ, либо дополнительный реабилитационный эффект РЭС) [4]. После тренировок у пациентов мультицентрового европейского исследования достоверно улучшалась также функция удержания равновесия, которая оценивалась по Шкале равновесия Берг (Berg Balance Scale) [4]. Данное улучшение вполне может рассматриваться как реабилитационный эффект ходьбы в экзоскелете, поскольку ходьба в РЭС сопряжена с тренировкой навыков попеременного переноса тяжести тела с одной ноги на другую [4]. Таким образом, вполне вероятно, что РЭС могут выполнять функцию реабилитационных тренажеров, существенно расширяющих возможности реабилитации в сравнении с существующей парадигмой локомоторных тренировок; однако эта гипотеза требует проведения контролируемых рандомизированных исследований, которые бы сравнили эффект от ходьбы в РЭС с эффектом тренировок иного типа [4,13].

### *Влияние ходьбы в экзоскелете на уровень общей физической активности и массу тела*

Низкая физическая активность является независимым фактором риска сердечно-сосудистых заболеваний, рака и смертности в целом [51]; у пациентов с ПСМТ недостаток физической активности вследствие постоянных пациентов с ПСМТ ассоциируется с остеопорозом [22, 52], ожирением [53], хронической патологией внутренних органов [54]. Поэтому для больных, перенесших ПСМТ, регулярные физические нагрузки являются важнейшим фактором снижения риска хронических заболеваний и повышения качества жизни в целом [4,47,48]. Согласно

современным рекомендациям, этим пациентам следует выполнять умеренные по интенсивности аэробные физические упражнения по 20 минут не реже трех раз в неделю [55]. РЭС представляют собой привлекательный реабилитационный инструмент для улучшения уровня физической активности спустя годы после травмы [4,56].

Однако во время ходьбы в экзоскелете пациент совершает лишь пассивные движения в суставах нижних конечностей, без напряжения мышечных групп, поэтому сложно сказать, можно ли считать ходьбу в РЭС аэробной тренировкой [13]. Так, исследование кардиометаболического ответа на 6-недельные тренировки, проведенные у 3 пациентов с полным поперечным поражением спинного мозга, показало, что энергетические затраты при ходьбе в экзоскелете были не настолько выраженными, чтобы иметь кардиореспираторный тренирующий эффект [13]. В то же время другое исследование, проведенное у 4 пациентов, продемонстрировало достаточно высокую интенсивность энергозатрат при ходьбе в РЭС, способную стимулировать улучшение толерантности к физическим нагрузкам [48]; возможно, тренирующий эффект обусловлен тем, что во время ходьбы в экзоскелете в работу вовлекаются мышцы туловища и верхних конечностей. Для обоснованных суждений о тренирующем влиянии ходьбы в РЭС на сердечную и легочную системы необходимо соблюдение единой методологии исследований [12].

Уменьшение времени пребывания пациента в положении сидя и лежа и повышение физической активности теоретически должно приводить к снижению массы тела, что весьма актуально для лиц, перенесших ПСМТ: известно, что две трети пациентов с ПСМТ обладают избыточным весом [57]. Действительно, в одной из публикаций показано, что пациент с полным поперечным поражением спинного мозга на Т4 уровне после 15 недельного курса тренировок в РЭС добился снижения массы тела на 6 кг [47]. Однако пока недостаточно данных о том, влияют ли реально тренировки в РЭС на снижение веса, либо это эффект целенаправленного похудения пациентов, мотивированных на ходьбу в экзоскелете: например, описаны случаи, когда пациенты, имевшие ожирение и, в связи с этим, ограничения к использованию РЭС, начинали соблюдать строгую диету и снижали массу тела, чтобы получить возможность использовать РЭС [13]. Кроме того, остается открытым вопрос, в какой степени тренировки в ЭС влияют на состав тела (на соотношение жира и безжировой массы тела), которому ряд исследователей придают особое значение при определении «кардио-метаболического» здоровья пациентов с ПСМТ [58].

Продемонстрировано также положительное влияние тренировок в экзоскелете на функцию кишечника: согласно данным метаанализа [11], 61% пациентов (95% ДИ: 20%-95%), участвовавших в трех исследованиях, отмечали после тренировок в РЭС улучшение моторики кишечника [31,36].

Вполне обосновано с теоретических позиций и предположение о благоприятном воздействии ходьбы в экзоскелете в отношении вторичной профилактики остеопороза [7], однако научно обоснованных доказательств этой гипотезе пока нет [49].

В целом, авторы метаанализа публикаций, посвященных использованию РЭС у пациентов с ПСМТ, сделали заключение о том, что РЭС позволяют пациентам с ПСМТ самостоятельно и безопасно передвигаться в реальной обстановке с пользой для здоровья [11]. Однако преимущества РЭС перед другими средствами кинезотерапии не вполне очевидны, по крайней мере, для пациентов с

давностью ПСМТ более года: авторы системного обзора, проанализировавшие результаты 9 рандомизированных исследований, не обнаружили преимуществ использования экзоскелетных устройств в качестве средства реабилитации пациентов с хронической ПСМТ в сравнении с традиционными методами реабилитации [3].

### **Безопасность ходьбы в роботизированных экзоскелетах**

Безопасность передвижения в экзоскелете должна обеспечиваться строгим соблюдением противопоказаний к его использованию, перечисленных в руководстве пользователя для каждой конкретной модели РЭС. Дизайн каждого из одобренных к практическому использованию экзоскелетов разрабатывался с позиций безопасности устройства, удобства его одевания/снятия, максимально возможной скорости ходьбы в ЭС; тем не менее, это не гарантирует риска возникновения тех или иных осложнений в процессе использования устройства [13]. Среди побочных эффектов ходьбы в РЭС у пациентов с ПСМТ наиболее часто встречаются описания травмы мягких тканей.

Среди 32 участников исследования экзоскелета Indego, проведенном в 5 центрах США (по 24 тренировочных занятия с каждым участником), у 6 человек было зарегистрировано 11 нежелательных явлений (НЯ), непосредственно связанных с ходьбой в экзоскелете [31,35,40]; девять из этих НЯ имели легкую степень выраженности, проявлялись покраснением кожи, небольшими ссадинами или отеком в области нижних конечностей, и быстро регрессировали после устранения фактора сдавления кожи. Два НЯ, имевшие среднюю степень тяжести, были представлены в одном случае растяжением связок в области голеностопного сустава, во втором – волдырем в области большого вертела бедренной кости, возникшем вследствие трения кожи о детали экзоскелета; эти НЯ не потребовали прерывания тренировок [28].

Среди 52 участников многоцентрового исследования экзоскелета Ekso, проведенном в 9 реабилитационных центрах Европы (тренировки проводились три раза в неделю в течение 8 недель), не было зарегистрировано ни одного серьезного нежелательного явления [4]. Три пациента вынуждены были прервать занятия из-за возникших отеков в области голеностопных суставов, у четырех развились нарушения кожной трофики в местах контактов тела с деталями устройства, однако эти больные тренировки завершили. У восьми пациентов однократно либо несколько раз возникало ортостатическое головокружение, у одного пациента имел место обморок, однако все эти больные завершили полный курс тренировок [4].

Теоретически существует риск развития болей в плечевых суставах в тех случаях, когда пациенту при ходьбе в экзоскелете приходится длительное время опираться на костыли [2]; однако опубликованных сведений о частоте развития такого осложнения нами не найдено.

Кроме того, существует риск переломов дистальных отделов большеберцовой и пяточной костей [13], хотя в реальной практике частота переломов очень невысока. Согласно метаанализу публикаций [11], среди 111 участников 14 различных исследований, касавшихся ходьбы в РЭС, лишь у одного пациента, не имевшего результатов денситометрии перед включением в исследование, был зарегистрирован перелом таранной кости [32]. Серьезных нежелательных явлений в процессе тренировок ходьбы в экзоскелете ни у одного из 111 участников зарегистрировано не было; хотя были зафиксированы 3

случая падения пациентов (все эти случаи наблюдались в одном и том же исследовании с применением самой первой версии экзоскелета Exso) [11]. Частота падений составила 4.4%.

Таким образом, практически все исследователи делают вывод о том, что ходьба в экзоскелете, при условии соблюдения показаний и противопоказаний, является для пациентов с ПСМТ безопасной, и это касается как острой, так и хронической ПСМТ, как пациентов с неполным, так и с полным поперечным повреждением спинного мозга [4, 28].

### **Нерешенные проблемы и перспективы дальнейших разработок РЭС для нужд пациентов с ПСМТ**

Противоречивость результатов и отсутствие однозначного мнения об эффективности использования ЭС у пациентов, перенесших ПСМТ, объясняются как неоднородностью методологий проведения исследования, так тем, что разные модели РЭС могут существенно различаться между собой по своим возможностям и удобству применения [12]. В настоящее время отсутствуют единые протоколы тренировок ходьбы в РЭС у пациентов с ПСМТ и единые системы оценок эффективности этих тренировок; нет сравнительных исследований разных моделей экзоскелетов [4,13].

#### *Перспективы научных исследований*

Вероятно, целесообразно изучать не «насколько эффективно использование роботов в нейрореабилитации», а «какие группы пациентов выигрывают от использования роботов в нейрореабилитации» – с острой или с хронической ПСМТ, с полным или с неполным поперечным повреждением спинного мозга, с параплегией или с тетрапарезом [4].

В первую очередь, остается невыясненным вопрос, в каком периоде ПСМТ наиболее эффективны тренировки в экзоскелете – в остром или в хроническом. По мнению многих исследователей, ранняя вертикализация пациента, перенесшего ПСМТ, позволяет снизить риск дальнейших осложнений [46], а рано начатые интенсивные тренировки шаговых движений способны улучшить локомоторные функции пациентов с ПСМТ [5]. Использование РЭС в раннем периоде после ПСМТ, вероятно, способно помочь в решении этих задач: так, одно из недавних исследований продемонстрировало улучшение параметров походки в результате тренировок в РЭС у 36% пациентов с острой (< 1 года) ПСМТ и лишь у 3% с хронической ПСМТ [4]. Однако этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Неясно также, в какой степени тренировки в экзоскелете могут быть использованы в качестве «task specific» тренировок, т.е. тренировок, ориентированных на конкретную задачу – а именно, на восстановление нормального паттерна ходьбы за счет стимулирования процессов нейрональной пластичности; решение этой задачи представляется наиболее реальным у пациентов с неполным поперечным поражением спинного мозга и требует дальнейших исследований [13].

#### *Перспективы совершенствования конструкций экзоскелетов*

Если говорить в целом, то, вероятно, уровень ожиданий как пациентов, так и реабилитологов в отношении возможностей робототехники завышен по отношению к современным инженерным возможностям [13]. Перспективы развития экзоскелетных технологий в медицинской реабилитации связывают с использованием современных технологий, которые позволят сделать РЭС более легкими и более быстрыми, способными к перемещению

по неровным и по наклонным поверхностям, имеющим водозащитное покрытие [8,13]. Уже сейчас в разработке находятся новые бренды РЭС, в которых управление устройством будет осуществляться при помощи джостика, что позволит применять экзоскелет у больных с более высоким уровнем травмы спинного мозга [26,59].

Актуальными задачами при разработке новых моделей РЭС являются упрощение процедуры индивидуальной настройки РЭС и сокращение времени адаптации пациента к РЭС [13]. Еще один важный аспект – создание моделей РЭС, пригодных для тренировок не только взрослых пациентов, но и детей разных возрастных групп [60]. Будущее РЭС связывают также с использованием при конструировании экзоскелетов таких вспомогательных технологий, как функциональная электростимуляция, интерфейсы «мозг-компьютер» [13].

### Выводы

В настоящее время не вызывает сомнений, что применение РЭС в медицинской реабилитации может благопри-

ятно влиять на некоторые физиологические показатели пациентов, перенесших ПСМТ. Возможно даже, что РЭС обладают потенциалом революционировать реабилитацию пациентов, перенесших ПСМТ, а высокие первоначальные затраты на приобретение РЭС будут оправданы с точки зрения предупреждения последующих затрат на терапию вторичных осложнений ПСМТ [11]. Однако все эти гипотезы требуют научных доказательств. Для выяснения потенциала использования РЭС в реабилитации больных, перенесших ПСМТ, необходимы рандомизированные контролируемые перекрестные исследования с применением конкретизированных критериев включения и исключения, с набором достаточных по объему групп пациентов [12]; необходима также разработка стандартных протоколов исследования РЭС, что сделает возможным сравнение результатов различных исследований [11]. Для выяснения потенциала использования экзоскелетов в качестве вспомогательных устройств для ходьбы требуются продолженные клинические наблюдения за пациентами с ПСМТ, использующими РЭС в своей повседневной жизни [2].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lee B.B., Cripps R.A., Fitzharris M., Wing P.C. The global map for traumatic spinal cord injury epidemiology: update 2011, global incidence rate. *Spinal Cord*, 2014; 52(2): 110 – 116 DOI: 10.1038/sc.2012.158
- Lajeunesse V., Vincent C., Routhier F., Careau E., Michaud F. Exoskeletons' design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2016; 11(7): 535 – 547 DOI: 10.3109/17483107.2015.1080766
- Fisahn C., Aach M., Jansen O., Moisi M., Mayadev A., Pagarigan K.T., Dettori J.R., Schildhauer T.A. The Effectiveness and Safety of Exoskeletons as Assistive and Rehabilitation Devices in the Treatment of Neurologic Gait Disorders in Patients with Spinal Cord Injury. 2016; 6(8): 822 – 84 DOI: 10.1055/s-0036-1593805
- Baunsgaard B.C., Nissen V.U., Brust K.A., Frotzler A., Ribeill C., Kalke Y.B., León N., Gómez B., Samuelsson K., Antepohl W., Holmström U., Marklund N., Glott T., Opheim A., Benito J., Murillo N., Nachttegaal J., Faber W., Biering-Sørensen F. 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; (56): 106 – 116 DOI: 10.1038/s41393-017-0013-7
- Mehrholtz J., Kugler J., Pohl M. Locomotor training for walking after spinal cord injury. *Cochrane Database Syst Rev*, 2012; 11 DOI: 10.1002/14651858.CD006676.pub3.
- Sezer N., Akkus S., Ugurlu F.G. Chronic complications of spinal cord injury. *World J Orthop*, 2015; 6(1): 24 – 33 DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.24
- Mekki M., Delgado A.D., Fry A., Putrino D., Huang V. Robotic Rehabilitation and Spinal Cord Injury, a Narrative Review. *Neurotherapeutics*, 2018; 15(3): 604 – 617 DOI: 10.1007/s13311-018-0642-3
- Muijzer-Witteveen H., Sibum N., van Dijksseldonk R., Keijsers N., van Asseldonk E. [Questionnaire results of user experiences with wearable exoskeletons and their preferences for sensory feedback]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018; 15(1): 112 p. DOI: 10.1186/s12984-018-0445-0
- Huang V.S., Krakauer J.W. Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective. *J. Neuroeng Rehabil*, 2009; (6): 5 p. DOI: 10.1186/1743-0003-6-5
- Gorgey A., Sumrell R., Goetz L. Exoskeletal assisted rehabilitation after spinal cord injury. In: *Atlas of Orthoses and Assistive Devices*. 5th ed. Canada, Elsevier, 2018: 440 – 447
- 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)*, 2016; 9: 455 – 466 DOI: 10.2147/MDER.S103102
- Palermo A. E., Maher J. L., Baunsgaard C. B., Nash M. S. Clinician-focused overview of bionic exoskeleton use after spinal cord injury. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, 2017; 23(3): 234 – 244 DOI: 10.1310/sci2303-234
- Gorgey A.S. Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *World J Orthop*, 2018; 9(9): 112 – 119 DOI: 10.5312/wjo.v9.i9.112
- Aach M., Cruciger O., Sczesny-Kaiser M., Höfken 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. *Spine J*, 2014; 14(12): 2847 – 2853 DOI: 10.1016/j.spinee.2014.03.042
- Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н. Роботизированные технологии в нейрореабилитации: состояние вопроса. *Вестник восстановительной медицины* 2018; 2: 94 – 107.
- Бушков Ф.А., Клещун С.С., Косырева С.В., Бжилянский М.А., Иванова Г.Е., Шаталова О.Г. Клиническое исследование применения экзоскелета «Exoatlet» у спинальных пациентов. *Вестник Восстановительной медицины*. 2017; 2: 90 – 100.
- Spungen A.M., Asselin P.K., Fineberg D.B., Kornfeld S.D., Harel N.Y. Exoskeletal-assisted walking for persons with motor-complete paraplegia. Paper presented at: NATO Science and Technology Organization. Milan, Italy, 2013: 15 – 17
- Louie D.R., Eng J.J., Lam T. Spinal Cord Injury Research Evidence (SCIRE) Research Team. Gait speed using powered robotic exoskeletons after spinal cord injury: a systematic review and correlational study. *J Neuroeng Rehabil*, 2015; 12: 82 p. DOI: 10.1186/s12984-015-0074-9
- 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; 23: 245 – 255. DOI: 10.1310/sci16-00025
- Hoffmann-A.M.J. Indications of use: Esko [letter]. US Department of Health and Human Services. [https://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf16/K161443.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf16/K161443.pdf)
- Hoffmann-A.M.J. Indications of use: Indego [letter]. Department of Health and Human Services, 2016. [https://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf15/k152416.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf15/k152416.pdf)
- Qin W., Bauman W.A., Cardozo C. Bone and muscle loss after spinal cord injury: organ interactions. *Ann N Y Acad Sci*, 2010; 1211: 66 – 84 DOI: 10.1111/j.1749-6632.2010.05806.x
- Garland D.E., Adkins R.H., Stewart C.A. Five-year longitudinal bone evaluations in individuals with chronic complete spinal cord injury. *J Spinal Cord Med*, 2008; 31: 543 – 550 DOI: 10.1080/10790268.2008.11753650
- Cirigliaro 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; 28: 747 – 765 DOI: 10.1007/s00198-016-3798-x
- Groah S.L., Schladen M., Pineda C.G., Hsieh C.H. Prevention of Pressure Ulcers Among People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review. *PM R*, 2015; 7: 613 – 636 DOI: 10.1016/j.pmrj.2014.11.014
- Tamez D.J., Ugalde C.R., Kilicarslan A., Venkatakrishnan A., Soto R., Contreras-Vidal J.L. Real-time strap pressure sensor system for powered exoskeletons. *Sensors (Basel)*, 2015; 15: 4550 – 4563 DOI: 10.3390/s150204550

27. Evans N., Wingo B., Sasso E., Hicks A., Gorgey A.S., Harness E. Exercise Recommendations and Considerations for Persons With Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil.*, 2015; 96: 1749 – 175 DOI: 10.1016/j.apmr.2015.02.005
28. Tefertiller C., Hays K., Jones J., Jayaraman A., Hartigan C., Bushnik T., Forrest G. Initial outcomes from a multicenter study utilizing the Indego Powered Exoskeleton in spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2018; 24(1): 78 – 85 DOI: 10.1310/sci17-00014
29. Dijkers M.P., Akers K.G., Dieffenbach S., Galen S.S. Systematic Reviews of Clinical Benefits of Exoskeleton Use for Gait and Mobility in Neurologic Disorders: A Tertiary Study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2019 pii: S0003-9993(19)30152-2. DOI: 10.1016/j.apmr.2019.01.025
30. Liberati A., Altman D.G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P.C., Ioannidis J.P., Clarke M., Devereaux P.J., Kleijnen J., Moher D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Ann Intern Med.*, 2009; 151(4): 65 – 94 DOI: 10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00136
31. Esquenazi A., Talaty M., Packer 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; 91: 911 – 921 DOI: 10.1097/PHM.0b013e318269d9a3.
32. Benson I., Hart K., Tussler D., van Middendorp J.J. Lower-limb exoskeletons for individuals with chronic spinal cord injury: findings from a feasibility study. *Clin Rehabil.*, 2016; 30(1): 73 – 84 DOI: 10.1177/0269215515575166
33. Asselin P., Knezevic S., Kornfeld S., Cirnigliaro C., Agranova-Breyer I., Bauman W.A., Spungen A.M. Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia. *J Rehabil Res Dev.*, 2015; (52): 147 – 158 DOI: 10.1682/JRRD.2014.02.0060
34. Arazpour M., Bani M.A., Hutchins S.W., Jones R.K. The physiological cost index of walking with mechanical and powered gait orthosis in patients with spinal cord injury. *Spinal Cord.*, 2013; 51(5): 356 – 359 DOI: 10.1038/sc.2012.162
35. Yang A., Asselin P., Knezevic S., Kornfeld S., Spungen A.M. Assessment of in-hospital walking velocity and level of assistance in a powered exoskeleton in persons with spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2015; 21(2): 100 – 109 DOI: 10.1310/sci2102-100
36. Zeilig G., Weingarden H., Zwecker M., Dudkiewicz I., Bloch A., Esquenazi A. Safety and tolerance of the ReWalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: a pilot study. *J Spinal Cord Med.*, 2012; 35(2): 96 – 101 DOI: 10.1179/2045772312Y.0000000003
37. Talaty M., Esquenazi A., Briceno J.E. Differentiating ability in users of the ReWalk TM powered exoskeleton: an analysis of walking kinematics. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.*, 2013; 1 – 5 Seattle, WA. DOI: 10.1109/ICORR.2013.6650469
38. Spungen A.M., Asselin P.K., Fineberg D.B., Kornfeld S.D., Harel N.Y. Exoskeletal-assisted walking for persons with motor-complete paraplegia. Paper presented at: NATO Science and Technology Organization, Milan, Italy, 2013; 15 – 17
39. Geigle P.R., Kallins M. Exoskeleton-Assisted Walking for People With Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil.*, 2017; 98(7): 1493 – 1495 DOI: 10.1016/j.apmr.2016.12.002
40. Asselin P., Fineberg D., Harel N.Y., et al. One-month follow-up for robotic exoskeletal walking measurements. *J Spinal Cord Med.*, 201; 36: 537 – 538
41. Farris R.J., Quintero H.A., Murray S.A., Ha K.H., Hartigan C., Goldfarb M. A preliminary assessment of legged mobility provided by a lower limb exoskeleton for persons with paraplegia. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.*, 2014; 22: 482 – 490 DOI: 10.1109/TNSRE.2013.2268320
42. Neuhaus P.D., Noorden J.H., Craig T.J., Torres T., Kirschbaum J., Pratt J.E. Design and evaluation of Mina: a robotic orthosis for paraplegics. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.* Zurich, 2011 DOI:10.1109/ICORR.2011.5975468
43. Lam T., Wirz M., Lünenburger L., Dietz V. Swing phase resistance enhances flexor muscle activity during treadmill locomotion in incomplete spinal cord injury. *Neurorehabil. Neural Repair.*, 2008; 22: 438 – 446 DOI:10.1177/1545968308315595
44. Ekelem A., Murray S., Goldfarb M. Preliminary assessment of variable geometry stair ascent and descent with a powered lower limb orthosis for individuals with paraplegia. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.*, 2015; 4671 – 4674 DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319436
45. Lemay V., Routhier F., Noreau L., Phang S.H., Ginis K.A. Relationships between wheelchair skills, wheelchair mobility and level of injury in individuals with spinal cord injury. *Spinal Cord.*, 2012; 50: 37 – 41 DOI: 10.1038/sc.2011.98
46. 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; 39(2): 277 – 283 DOI: 10.3233/NRE-161358
47. 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; 23: 245 – 255 DOI: 10.1310/sci16-00025
48. Evans N., Hartigan C., Kandilakis C., Pharo E., Clesson I. Acute cardiorespiratory and metabolic responses during exoskeleton-assisted walking over-ground among persons with chronic spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2015; 21(2): 122 – 132 DOI: 10.1310/sci2102-122
49. Aach M., Cruciger O., Sczesny-Kaiser M., Höffken O., Meindl R.C., 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. *Spine J.*, 2014; 14(12): 2847 – 2853 DOI: 10.1016/j.spinee.2014.03.042
50. Cruciger O., Schildhauer T.A., Meindl R.C., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Citak M., Aach 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; 11(6): 529 – 534 DOI: 10.3109/17483107.2014.981875
51. Katzmarzyk P.T., Church T.S., Craig C.L., Bouchard C. Sitting time and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer. *Med Sci Sports Exerc.*, 2009; 41: 998 – 1005 DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181930355
52. Dolbow D.R., Gorgey A.S., Daniels J.A., Adler R.A., Moore J.R., Gater D.R. Jr. The effects of spinal cord injury and exercise on bone mass: a literature review. *NeuroRehabilitation.*, 2011; 29(3): 261 – 269 DOI: 10.3233/NRE-2011-0702
53. Gorgey A.S., Gater D.R. Jr. Prevalence of Obesity After Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2007; 12: 1 – 7 DOI: 10.1310/sci1204-1
54. Buchholz A.C., Martin Ginis K.A., Bray S.R., Craven B.C., Hicks A.L., Hayes K.C., Latimer A.E., McColl M.A., Potter P.J., Wolfe D.L. Greater daily leisure time physical activity is associated with lower chronic disease risk in adults with spinal cord injury. *Appl Physiol Nutr Metab.*, 2009; 34: 640 – 647 DOI: 10.1139/H09-050
55. Ginis M. K.A., van der Scheer J.W., Latimer-Cheung A.E., Barrow A., Bourne C., Carruthers P., Bernardi M., Ditor D.S., Gaudet S., de Groot S., Hayes K.C., Hicks A.L., Leicht C.A., Lexell J., Macaluso S., Manns P.J., McBride C.B., Noonan V.K., Pomerleau P., Rimmer J.H., Shaw R.B., Smith B., Smith K.M., Steeves J.D., Tussler D., West C.R., Wolfe D.L., Goosey-Tolfrey V.L. Evidence-based scientific exercise guidelines for adults with spinal cord injury: an update and a new guideline. *Spinal Cord.*, 2018; 56: 308 – 321 DOI: 10.1038/s41393-017-0017-3
56. 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; 23: 245 – 255 DOI: 10.1310/sci16-00025
57. Gorgey A.S., Gater D.R. Jr. Prevalence of Obesity after Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2007; 12: 1 – 7 DOI: 10.1310/sci1204-1
58. Nightingale T.E., Walhin J.P., Thompson D., Bilzon J.L. Biomarkers of cardiometabolic health are associated with body composition characteristics but not physical activity in persons with spinal cord injury. *J Spinal Cord Med.*, 2017; 1 – 10 DOI: 10.1080/10790268.2017.1368203
59. 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; 14: 60 p. DOI: 10.1186/s12984-017-0274-6
60. Lerner Z.F., Damiano D.L., Bulea T.C. A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy. *Sci Transl Med.*, 2017; 9 p. pii: eaam9145 DOI: 10.1126/scitranslmed.aam9145

## REFERENCES

1. Lee B.B., Cripps R.A., Fitzharris M., Wing P.C. The global map for traumatic spinal cord injury epidemiology: update 2011, global incidence rate. *Spinal Cord.*, 2014; 52(2): 110 – 116 DOI: 10.1038/sc.2012.158
2. Lajeunesse V., Vincent C., Routhier F., Careau E., Michaud F. Exoskeletons' design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury. *Disabil Rehabil Assist Technol.*, 2016; 11(7): 535 – 547 DOI: 10.3109/17483107.2015.1080766
3. Fisahn C., Aach M., Jansen O., Moisi M., Mayadev A., Pagarigan K.T., Dettori J.R., Schildhauer T.A. The Effectiveness and Safety of Exoskeletons as Assistive and Rehabilitation Devices in the Treatment of Neurologic Gait Disorders in Patients with Spinal Cord Injury. 2016; 6(8): 822 – 84 DOI: 10.1055/s-0036-1593805
4. Baunsgaard B.C., Nissen V.U., Brust K.A., Frotzler A., Ribeill C., Kalke Y.B., León N., Gómez B., Samuelsson K., Antepohl W., Holmström U., Marklund N., Glott T., Opheim A., Benito J., Murillo N., Nachtegaal J., Faber W., Biering-Sørensen F. 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; (56): 106 – 116 DOI: 10.1038/s41393-017-0013-7

5. Mehrholz J, Kugler J, Pohl M. Locomotor training for walking after spinal cord injury. *Cochrane Database Syst Rev.*, 2012; 11 DOI: 10.1002/14651858.CD006676.pub3.
6. Sezer N, Akkus S, Ugurlu F.G. Chronic complications of spinal cord injury. *World J Orthop.*, 2015; 6(1): 24 – 33 DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.24
7. Mekki M., Delgado A.D., Fry A., Putrino D., Huang V. Robotic Rehabilitation and Spinal Cord Injury, a Narrative Review. *Neurotherapeutics*, 2018; 15(3): 604 – 617 DOI: 10.1007/s13311-018-0642-3
8. Muijzer-Witteveen H., Sibum N., van Duijsseldonk R., Keijsers N., van Asseldonk E. [Questionnaire results of user experiences with wearable exoskeletons and their preferences for sensory feedback]. *J Neuroeng Rehabil.*, 2018; 15(1): 112 p. DOI: 10.1186/s12984-018-0445-0
9. Huang V.S., Krakauer J.W. Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective. *J. Neuroeng Rehabil.*, 2009; (6): 5 p. DOI: 10.1186/1743-0003-6-5
10. Gorgey A., Sumrell R., Goetz L. Exoskeletal assisted rehabilitation after spinal cord injury. In: *Atlas of Orthoses and Assistive Devices*. 5th ed. Canada, Elsevier, 2018: 440 – 447
11. 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)*, 2016; 9: 455 – 466 DOI: 10.2147/MDER.S103102
12. Palermo A. E., Maher J. L., Baunsgaard C. B., Nash M. S. Clinician-focused overview of bionic exoskeleton use after spinal cord injury. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, 2017; 23(3): 234 – 244 DOI: 10.1310/sci2303-234
13. Gorgey A.S. Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *World J Orthop.*, 2018; 9(9): 112 – 119 DOI: 10.5312/wjo.v9.i9.112
14. 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. *Spine J.*, 2014; 14(12): 2847 – 2853 DOI: 10.1016/j.spinee.2014.03.042
15. Belova A.N., Borzikov V.V., Kuznetsov A.N., Rukina N.N. Robotizirovannye tekhnologii v nejroreabilitacii: sostoyanie voprosa [Robotic technologies in neurorehabilitation: state of the issue]. *Vestnik vosstanovitelnoj mediciny*, 2018; 2(84): 94 – 107 (In Russ.)
16. Bushkov F.A., Kleshchunov S.S., Kosiaeva S.V., Bzhiliansky M.A., Ivanova G.E., Shatalova O.G. Klinicheskoe issledovanie primeneniya ekzoskeleta «Exoatlet» u spinal'nyh pacientov [Clinical trial applications of the locomotion exoskeleton "Exoatlet" in spinal patients]. *Vestnik vosstanovitelnoj mediciny*, 2017; 2(78): 90 – 100 (In Russ.)
17. Spungen A.M., Asselin P.K., Fineberg D.B., Kornfeld S.D., Harel N.Y. Exoskeletal-assisted walking for persons with motor-complete paraplegia. Paper presented at: NATO Science and Technology Organization, Milan, Italy, 2013: 15 – 17
18. Louie D.R., Eng J.J., Lam T. Spinal Cord Injury Research Evidence (SCIRE) Research Team. Gait speed using powered robotic exoskeletons after spinal cord injury: a systematic review and correlational study. *J Neuroeng Rehabil.*, 2015; 12: 82 p. DOI: 10.1186/s12984-015-0074-9
19. 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; 23: 245 – 255. DOI: 10.1310/sci16-00025
20. Hoffmann-A M.J. Indications of use: Esko [letter]. US Department of Health and Human Services. [https://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf16/K161443.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf16/K161443.pdf)
21. Hoffmann-A M.J. Indications for use: Indego [letter]. Department of Health and Human Services, 2016. [https://www.accessdata.fda.gov/cdrh\\_docs/pdf15/k152416.pdf](https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf15/k152416.pdf)
22. Qin W., Bauman W.A., Cardozo C. Bone and muscle loss after spinal cord injury: organ interactions. *Ann N Y Acad Sci.*, 2010; 1211: 66 – 84 DOI: 10.1111/j.1749-6632.2010.05806.x
23. Garland D.E., Adkins R.H., Stewart C.A. Five-year longitudinal bone evaluations in individuals with chronic complete spinal cord injury. *J Spinal Cord Med.*, 2008; 31: 543 – 550 DOI: 10.1080/10790268.2008.11753650
24. 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; 28: 747 – 765 DOI: 10.1007/s00198-016-3798-x
25. Groah S.L., Schladen M., Pineda C.G., Hsieh C.H. Prevention of Pressure Ulcers Among People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review. *PM R.*, 2015; 7: 613 – 636 DOI: 10.1016/j.pmrj.2014.11.014
26. Tamez D.J., Ugalde C.R., Kilicarslan A., Venkatakrisnan A., Soto R., Contreras-Vidal J.L. Real-time strap pressure sensor system for powered exoskeletons. *Sensors (Basel)*, 2015; 15: 4550 – 4563 DOI: 10.3390/s150204550
27. Evans N., Wingo B., Sasso E., Hicks A., Gorgey A.S., Harness E. Exercise Recommendations and Considerations for Persons With Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil.*, 2015; 96: 1749 – 175 DOI: 10.1016/j.apmr.2015.02.005
28. Tefertiller C., Hays K., Jones J., Jayaraman A., Hartigan C., Bushnik T., Forrest G. Initial outcomes from a multicenter study utilizing the Indego Powered Exoskeleton in spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2018; 24(1): 78 – 85 DOI: 10.1310/sci17-00014
29. Dijkers M.P., Akers K.G., Dieffenbach S., Galen S.S. Systematic Reviews of Clinical Benefits of Exoskeleton Use for Gait and Mobility in Neurologic Disorders: A Tertiary Study. *Arch Phys Med Rehabil.*, 2019 pii: S0003-9993(19)30152-2. DOI: 10.1016/j.apmr.2019.01.025
30. Liberati A., Altman D.G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P.C., Ioannidis J.P., Clarke M., Devereaux P.J., Kleijnen J., Moher D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Ann Intern Med.*, 2009; 151(4): 65 – 94 DOI: 10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00136
31. 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; 91: 911 – 921 DOI: 10.1097/PHM.0b013e318269d9a3.
32. Benson I., Hart K., Tussler D., van Middendorp J.J. Lower-limb exoskeletons for individuals with chronic spinal cord injury: findings from a feasibility study. *Clin Rehabil.*, 2016; 30(1): 73 – 84 DOI: 10.1177/0269215515575166
33. Asselin P., Knezevic S., Kornfeld S., Cirnigliaro C., Agranova-Breyter I., Bauman W.A., Spungen A.M. Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia. *J Rehabil Res Dev.*, 2015; (52): 147 – 158 DOI: 10.1682/JRRD.2014.02.0060
34. Arazpour M., Bani M.A., Hutchins S.W., Jones R.K. The physiological cost index of walking with mechanical and powered gait orthosis in patients with spinal cord injury. *Spinal Cord.*, 2013; 51(5): 356 – 359 DOI: 10.1038/sc.2012.162
35. Yang A., Asselin P., Knezevic S., Kornfeld S., Spungen A.M. Assessment of in-hospital walking velocity and level of assistance in a powered exoskeleton in persons with spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2015; 21(2): 100 – 109 DOI: 10.1310/sci2102-100
36. Zeilig G., Weingarden H., Zwecker M., Dudkiewicz I., Bloch A., Esquenazi A. Safety and tolerance of the ReWalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: a pilot study. *J Spinal Cord Med.*, 2012; 35(2): 96 – 101 DOI: 10.1179/2045772312Y.00000000003
37. Talaty M., Esquenazi A., Briceno J.E. Differentiating ability in users of the ReWalk TM powered exoskeleton: an analysis of walking kinematics. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.*, 2013: 1 – 5 Seattle, WA. DOI: 10.1109/ICORR.2013.6650469
38. Spungen A.M., Asselin P.K., Fineberg D.B., Kornfeld S.D., Harel N.Y. Exoskeletal-assisted walking for persons with motor-complete paraplegia. Paper presented at: NATO Science and Technology Organization, Milan, Italy, 2013: 15 – 17
39. Geigle P.R., Kallins M. Exoskeleton-Assisted Walking for People With Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil.*, 2017; 98(7): 1493 – 1495 DOI: 10.1016/j.apmr.2016.12.002
40. Asselin P., Fineberg D., Harel N.Y., et al. One-month follow-up for robotic exoskeletal walking measurements. *J Spinal Cord Med.*, 201; 36: 537 – 538
41. Farris R.J., Quintero H.A., Murray S.A., Ha K.H., Hartigan C., Goldfarb M. A preliminary assessment of legged mobility provided by a lower limb exoskeleton for persons with paraplegia. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.*, 2014; 22: 482 – 490 DOI: 10.1109/TNSRE.2013.2268320
42. Neuhaus P.D., Noorden J.H., Craig T.J., Torres T., Kirschbaum J., Pratt J.E. Design and evaluation of Mina: a robotic orthosis for paraplegics. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.* Zurich, 2011 DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975468
43. Lam T., Wirz M., Lünenburger L., Dietz V. Swing phase resistance enhances flexor muscle activity during treadmill locomotion in incomplete spinal cord injury. *Neurorehabil. Neural Repair.*, 2008; 22: 438 – 446 DOI: 10.1177/1545968308315595
44. Ekelem A., Murray S., Goldfarb M. Preliminary assessment of variable geometry stair ascent and descent with a powered lower limb orthosis for individuals with paraplegia. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.*, 2015: 4671 – 4674 DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319436
45. Lemay V., Routhier F., Noreau L., Phang S.H., Ginis K.A. Relationships between wheelchair skills, wheelchair mobility and level of injury in individuals with spinal cord injury. *Spinal Cord.*, 2012; 50: 37 – 41 DOI: 10.1038/sc.2011.98
46. 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; 39(2): 277 – 283 DOI: 10.3233/NRE-161358
47. 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; 23: 245 – 255 DOI: 10.1310/sci16-00025

48. Evans N., Hartigan C., Kandilakis C., Pharo E., Clesson I. Acute cardiorespiratory and metabolic responses during exoskeleton-assisted walking over-ground among persons with chronic spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2015; 21(2): 122 – 132 DOI: 10.1310/sci2102-122
49. Aach M., Cruciger O., Sczesny-Kaiser M., Höffken O., Meindl R.C., 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. *Spine J.*, 2014; 14(12): 2847 – 2853 DOI: 10.1016/j.spinee.2014.03.042
50. Cruciger O., Schildhauer T.A., Meindl R.C., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Citak M., Aach 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; 11(6): 529 – 534 DOI: 10.3109/17483107.2014.981875
51. Katzmarzyk P.T., Church T.S., Craig C.L., Bouchard C. Sitting time and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer. *Med Sci Sports Exerc.*, 2009; 41: 998 – 1005 DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181930355
52. Dolbow D.R., Gorgey A.S., Daniels J.A., Adler R.A., Moore J.R., Gater D.R. Jr. The effects of spinal cord injury and exercise on bone mass: a literature review. *NeuroRehabilitation.*, 2011; 29(3): 261 – 269 DOI: 10.3233/NRE-2011-0702
53. Gorgey A.S., Gater D.R. Jr. Prevalence of Obesity After Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2007; 12: 1 – 7 DOI: 10.1310/sci1204-1
54. Buchholz A.C., Martin Ginis K.A., Bray S.R., Craven B.C., Hicks A.L., Hayes K.C., Latimer A.E., McColl M.A., Potter P.J., Wolfe D.L. Greater daily leisure time physical activity is associated with lower chronic disease risk in adults with spinal cord injury. *Appl Physiol Nutr Metab.*, 2009; 34: 640 – 647 DOI: 10.1139/H09-050
55. Ginis M. K.A., van der Scheer J.W., Latimer-Cheung A.E., Barrow A., Bourne C., Carruthers P., Bernardi M., Ditor D.S., Gaudet S., de Groot S., Hayes K.C., Hicks A.L., Leicht C.A., Lexell J., Macaluso S., Manns P.J., McBride C.B., Noonan V.K., Pomerleau P., Rimmer J.H., Shaw R.B., Smith B., Smith K.M., Steeves J.D., Tussler D., West C.R., Wolfe D.L., Goosey-Tolfrey V.L. Evidence-based scientific exercise guidelines for adults with spinal cord injury: an update and a new guideline. *Spinal Cord.*, 2018; 56: 308 – 321 DOI: 10.1038/s41393-017-0017-3
56. 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; 23: 245 – 255 DOI: 10.1310/sci16-00025
57. Gorgey A.S., Gater D.R. Jr. Prevalence of Obesity After Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.*, 2007; 12: 1 – 7 DOI: 10.1310/sci1204-1
58. Nightingale T.E., Walhin J.P., Thompson D., Bilzon J.L. Biomarkers of cardiometabolic health are associated with body composition characteristics but not physical activity in persons with spinal cord injury. *J Spinal Cord Med.*, 2017; 1 – 10 DOI: 10.1080/10790268.2017.1368203
59. 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; 14: 60 p. DOI: 10.1186/s12984-017-0274-6
60. Lerner Z.F., Damiano D.L., Bulea T.C. A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy. *Sci Transl Med.*, 2017; 9 p. pii: eaam9145 DOI: 10.1126/scitranslmed.aam9145



#### Контактная информация:

**Шейко Геннадий Евгеньевич**, кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник  
E-mail: sheikogennadii@yandex.ru

#### Contact information:

**Gennadiy E. Sheiko**, candidate of medical sciences, junior research scientist  
E-mail: sheikogennadii@yandex.ru