

ОБЗОРЫ, ЛЕКЦИИ, ДОКЛАДЫ, ИСТОРИЧЕСКИЕ ОЧЕРКИ

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА В НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

УДК 612.76:616.831 – 009.12 – 053.2

Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Нижний Новгород, Россия

ROBOTIC DEVICES IN NEUROREHABILITATION: REVIEW

Belova A.N., Borzikov V.V., Kuznetsov A.N., Rukina N.N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Privolzhsky Research Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Nizhnij Novgorod, Russia

Введение

Старение населения во всем мире неизбежно сопровождается ростом неврологической заболеваемости и, соответственно, числа лиц с тяжелыми двигательными нарушениями. В связи с этим неизбежно растет спрос на новые эффективные методы их медицинской реабилитации. Одним из перспективных направлений в нейрореабилитации является использование роботов и робототехнических устройств, которые позволяют существенно расширить возможности кинезотерапии пациентов с двигательными расстройствами. Доказательством актуальности проблемы создания эффективных роботизированных методов лечения служит создание специального информационного ресурса «Европейская сеть по робототехнике в нейрореабилитации» («European Network on Robotics for NeuroRehabilitation»), в рамках которого разработан проект STARS (State of the Art Robot-Supported assessments, или Оценка сервисных «роботов на уровне искусства») и сформирована междисциплинарная команда ведущих исследователей в сферах робототехники, клинической двигательной нейрореабилитации, вычислительной техники и нейровизуализации; целью проекта является координация основных и прикладных исследований в области робототехники, [http://www.cost.eu/COST_Actions/bmbs/TD1006]. Целью нашего обзора является предоставление врачам и кинезотерапевтам сведений о роботизированных устройствах, которые в настоящее

время используются в целях нейрореабилитации, и о требованиях, предъявляемых к вновь разрабатываемым нейророботам.

Общие представления о реабилитационных роботах и робототехнических устройствах

Термин «робот» впервые был употреблен в пьесе чешского писателя Карела Чапека «Р.У.Р.» («Россумские универсальные роботы», 1921); в переводе с чешского языка слово «robota» означает «каторга», «тяжелый физический труд» [1]. С тех пор этот термин стали обозначать преимущественно электромеханические устройства, нередко «гуманоидные», наделенные искусственным интеллектом и способных выполнять различные функции, частично благодаря программированию, частично – в результате способности действовать автономно [2]. Американский Институт Роботов (Robot Institute of America) определяет термин «робот» как «программируемый многофункциональный манипулятор, предназначенный для перемещения материала, частей или специализированных устройств путем различных программируемых движений, позволяющих выполнять множества заданий» [3].

Согласно определениям, данным в ГОСТ Р 60.2.2.1–2016/ИСО 13482:2014, *робот (robot)* – это исполнительный механизм с двумя или более степенями подвижности, обладающий определенным уровнем автономности и перемещающийся во внешней среде с целью

выполнения поставленных задач (автономность – способность выполнять поставленные задачи в зависимости от текущего состояния и восприятия окружающей среды без вмешательства человека). *Робототехническое устройство* (robotic device) – это исполнительный механизм, обладающий свойствами промышленного или сервисного робота, но у которого отсутствует требуемое число программируемых степеней подвижности или определенный уровень автономности. В медицинской литературе термины «робот» (Р) и «роботизированное устройство» (РУ) чаще используют как синонимы, поэтому далее для обозначения и тех, и других мы будем использовать аббревиатуру РУ.

В нейрореабилитации РУ стали впервые использоваться с 1980-х годов [4], их потенциал был оценен в 1990-х [5, 6], а с 2000х годов появились экзоскелеты [7, 8]. Нейророботы относятся к отрасли науки, объединяющей нейробиологию, робототехнику и искусственный интеллект.

Существующие устройства для ассистирования движений у пациентов с неврологической патологией можно разделить на две категории: электромеханические устройства и РУ, при этом фундаментальным отличием РУ от электромеханических устройств является их адаптивность [1]. Свойство адаптивности основано на наличии в РУ встроенных сенсоров, сигналы от которых обрабатываются искусственным интеллектом устройства и служат основой для изменения действий, им осуществляемых. Типичные РУ могут передавать инструкции пациентам о том, как выполнять определенные движения, могут помогать выполнению движений и управлять ими, могут объективно оценивать возможности движения. Однако в публикациях нейрореабилитологов, касающихся анализа эффективности роботизированной техники, электромеханические устройства и роботы нередко группируются вместе [9].

Классификации РУ для нейрореабилитации может проводиться, исходя из основной функции устройства; технических характеристик системы; используемой стратегии контроля движений человека; с учетом той части тела, для которой предназначено устройство, и способом взаимодействия с ним; исходя из мобильности устройства [10].

Согласно основной функции, используемые в нейрореабилитации РУ относятся к категории роботов по персональному уходу (personal care robot) [ГОСТ 2018]. Согласно техническим характеристикам, реабилитационные роботы могут быть классифицированы на две основные группы: *энд-эффекторы* (end-effectors, англ) и *экзоскелеты*. Энд-эффекторы чаще применяются для верхних конечностей, при их использовании пациент держит в руке манипулятор, который управляется извне с помощью РУ [11]. *Экзоскелет* – это устройство, которое надевается на туловище или на конечность человека в виде внешнего каркаса, повторяет биомеханику его движений [12]. Значительно чаще экзоскелеты используются для обучения ходьбе и стоянию, однако существуют экзоскелеты и для верхней конечностей (рука замкнута в рукав, который повторяет ее конфигурацию). Экзоскелет позволяет увеличить мышечную силу путем прямого переноса механической энергии от устройства к человеку [13, 14]. Согласно стратегии контроля, РУ классифицируют как пре-программируемые (программа задается заранее) и программируемые в процессе выполнения тренировок. Согласно размерам и мобильности устройства, РУ разделяют на носимые

(пациент носит РУ на себе – например, экзоскостюм); мобильные (устройство преимущественно опирается на собственный вес и может двигаться в пространстве при помощи колёс, шагающего механизма или подвесной подвески), стационарные (крепятся к стене или полу и не способны передвигаться).

В таблицах 1 и 2 перечислены основные реабилитационные роботизированные устройства, которые производятся в настоящее время.

Клиническая эффективность робототерапии в нейрореабилитации

Основными категориями больных, нуждающихся в интенсивной двигательной реабилитации, являются пациенты, перенесшие мозговой инсульт, позвоночно-спинномозговую травму (ПСМТ), тяжелую черепно-мозговую травму (ЧМТ), а также пациенты с детским церебральным параличом [15, 16].

Теоретическим обоснованием целесообразности использования РУ в нейрореабилитации является так называемый «феномен моторного обучения»: для закрепления в памяти головного мозга двигательного акта необходимы многократные повторные интенсивные целенаправленные («task-oriented») движения, требующие внимания и усилий пациента [17, 18, 19]. Полагают, что длительные повторные интенсивные движения вызывают усиление потока афферентной импульсации от парализованной конечности к головному мозгу, что, в свою очередь, активирует процессы нейропластичности центральной нервной системы (ЦНС), лежащие в основе истинного восстановления нарушенных функций [20]. Преимущества робототерапии перед традиционной кинезотерапией заключаются в ее интенсификации (возможность использования ее в течение более длительных периодов времени с моделированием нагрузки без переутомления пациента) и в обеспечении возможности выполнения более сложных движений [21]. Кроме того, современные РУ обеспечивают наличие обратной связи роботизированного тренажера и пациента во время терапевтического вмешательства, что повышает безопасность тренировок и увеличивает мотивированность пациента, поскольку пациенту предоставляются объективные показатели достигнутых результатов [22]. Потенциальный позитивный эффект от использования робототехники в нейрореабилитации заключается также в возможности одновременного проведения занятия одним кинезотерапевтом с несколькими пациентами. Поскольку осуществление классической интенсивной двигательной терапии посредством физических упражнений требует участия значительного количества медицинского персонала, на каждую тренировку возможно затрачивать лишь сравнительно небольшое количество времени; кроме того, восстановительная терапия, осуществляемая «вручную» является трудновыполнимой у пациентов, с большим весом или имеющих спастические проявления [23]. Таким образом, автоматизирование процесса позволяет не только проводить более длительные и эффективные занятия для пациентов, но и уменьшить физическую нагрузку на кинезотерапевта [10].

Однако имеются и *риски*, связанные с применением нейрореабилитационных РУ. Так, в обзоре, представленном в 2013 г. E. Datteri и коллегами, приводятся примеры исследований, в которых было продемонстрировано отрицательные последствия использования в

Таблица 1. Реабилитационные роботизированные устройства для верхней части туловища и рук.

№	Название	Краткое описание устройства
Стационарные роботизированные устройства для верхней части туловища и руки		
1	InMotion Arm (Bionik Labs)	Интерактивная система реабилитации, реагирующая на движения пациента и предоставляющая необходимую помощь. Используется для реабилитации движений верхней конечности в плечевом и локтевом суставах http://bionikusa.com/healthcarereform/upper-extremity-rehabilitation/inmotion2-arm/
2	InMotion Wrist (Bionik Labs)	Интерактивная система реабилитации, реагирующая на движения пациента и предоставляющая необходимую помощь. Используется для реабилитации движений http://bionikusa.com/healthcarereform/upper-extremity-rehabilitation/inmotion-wrist/
3	Armeo (Hocoma)	Система реабилитации движений верхних конечностей разработанная для пациентов на ранней стадии реабилитации. Обладает шестью степенями свободы движения и интеллектуальной системой помощи движения для пациентов не способных выполнять задачи самостоятельно https://www.hocoma.com/services/product-training/armeo/
4	ALEx (KineteK Wearable Robotics)	Экзоскелет для нейромоторной реабилитации функции верхней конечности. Обладает 6 степенями свободы движений, что покрывает около 90% естественных движений человеческой руки, а также, в случае необходимости предоставляет помощь движению, если пациент не в состоянии завершить его самостоятельно http://www.wearable-robotics.com/kinetek/products/alex/
5	Track-Hold (KineteK Wearable Robotics)	Реабилитационное устройство для пассивной тренировки верхних конечностей с обеспечением поддержки движений. В отличие от других устройств, изменение объема поддержки основывается на добавлении/убавлении физического веса, что может быть легко выполнено физиотерапевтом. http://www.wearable-robotics.com/kinetek/products/track-hold/
6	Power Jacket REALIVE (Panasonic ActiveLink)	Является одним из самых первых мягких экзоскелетов для реабилитации пост-инсультных пациентов, утративших способность двигать верхними конечностями. Особенностью данного экзоскелета является лёгкость его ношения. Один из рукавов обладает бесконтактными сенсорами, которые отслеживают положение здоровой руки. Другой рукав оборудован 8 воздушными мышцами, которые сокращаются при помощи воздушного компрессора. Таким образом, одна рука является телеоператором, тогда как другая выполняет движения http://exoskeletonreport.com/2015/08/soft-exoskeletons-and-exosuits/
7	HARMONY (ReNeu Robotics Lab)	Экзоскелет для реабилитации функций верхней конечности. Обеспечивает необходимую поддержку движениям пациента https://reneu.robotics.utexas.edu/projects/harmony-exoskeleton
Стационарные реабилитационные экзоскелеты для кисти руки		
1	Amadeo (Tyromotion)	Роботизированная система реабилитации функций пальцев и кисти. Обладает специализированным гибким набором функций программного обеспечения и предлагает расширенный спектр вариантов терапии http://tyromotion.com/en/products/amadeo
2	InMotion Hand (Bionik Labs)	Является одним из модулей системы InMotion Arm. Умная система реабилитации функций кисти. Может использоваться для тренировки кистевого схвата и разжимания отдельно или совместно с роботом InMotion Arm. http://bionikusa.com/healthcarereform/upper-extremity-rehabilitation/inmotion-hand/
3	Hand of Hope (Rehab-Robotics)	Терапевтическое устройство для нервно-мышечной реабилитации кисти и предплечья. Данное устройство обладает биологической обратной связью с использованием поверхностных ЭМГ датчиков размещаемых на пациенте для активации движений кисти. http://www.rehab-robotics.com/hoh/
4	Hand-Wrist Assisting Robotic Device (HOWARD)	Роботизированное реабилитационное устройство, разработанное для восстановления нормальной силы и функций кисти пациентов перенесших инсульт. Обладает тремя степенями свободы движений и пневматическими приводами. Рука закрепляется устройстве, после чего пациент начинает совершение движения. В случае необходимости данное устройство помогает пациенту завершить движение, благодаря чему быстрее восстанавливаются нейронные связи, что в свою очередь ускоряет процесс реабилитации. Кроме того устройство способно записывать данные каждой тренировочной сессии и предоставлять точную оценку прогресса. http://ieeexplore.ieee.org/document/1501041/

Мобильные экзоскелеты для верхней части туловища и руки		
1	MyoPro Motion G (Myomo)	Экзоскелет для поддержки и реабилитации функций верхней конечности в локтевом, лучезапястном суставах и кисти. Для управления движениями паретической или ослабленной руки используются мышечные сигналы, полученные с помощью поверхностных ЭМГ датчиков размещённых на самом пациенте http://myomo.com/
2	CARAPACE (Lorenzo Masia)	Ассистивный композитный экзоскелет верхней конечности с использованием гибких структурных механизмов и встроенных приводов. Способен при необходимости, помогать совершению движения пациентом или увеличивать силу движения http://lorenzomasia.info/projects/compliant-advanced-robotic-actuation-powering-composite-exoskeleton.html
3	Robotic Soft Extra Muscle (SEM) Glove (Bioservo)	Устройство для увеличения силы схвата кисти. Разработано для пациентов пострадавших от травмы, неврологической патологии или других заболеваний.
4	Pneumatic Power Assist Glove (Daiya)	Мягкий экзоскелет для кисти. Служит для увеличения силы схвата кисти. Состоит из перчатки с камерами для газа. Баллона с газом и модуля контроля и питания. https://www.better-grip.co.uk/
5	Inflatable Soft Exoskeleton (Otherlab Orthotics)	Мягкий пневматический экзоскелет для верхних и нижних конечностей. Ключевыми его особенностями являются: лёгкий вес, низкая стоимость и мощность. http://www.roamrobotics.com/#introduction
6	Inflatable Soft Robotic Glove (Wyss Institute)	Пневматический экзоскелет кисти. Отличительной особенностью является легко модифицируемая надувная мембрана, что позволяет точно подгонять экзоскелет по кисти человека за счёт чего пользоваться данным устройством можно дольше и с большим комфортом https://wyss.harvard.edu/technology/soft-robotic-glove/
7	Affordable Tremor Suppression Arm (MedEXO Robotics)	Многофункциональная носимая роботизированная перчатка. Данное устройство разработано для смягчения симптомов нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Паркинсона. Устройство не только стабилизирует руку пользователя снижая тремор, но и обеспечивает дополнительную силу для поддержки необходимых пользователю движений. http://www.medexorobotics.com/
8	KINARM (Exoskeleton Lab by BKIN Technologies)	Роботизированное устройство для исследования функций верхних конечностей, позволяющее совершать ладонные движения руки в горизонтальной плоскости, включая сгибание и разгибание в плечевом и локтевом суставах. Сенсоры, встроенные в устройство отслеживают движения в горизонтальной плоскости, на основе чего к каждому суставу независимо может применяться определённая нагрузка. http://www.bkintechologies.com/bkin-products/kinarm-exoskeleton-lab/

реабилитации широко известного роботизированного тренажера Локомат [24]. В результате ограничения движений в тазовом поясе, нарушенной кинематики движений в суставах нижних конечностей и нефизиологической активации мышц тренажер воспроизводил у пациентов с парезами ног патологические и нефизиологические паттерны ходьбы [25]. В современных версиях Локомата добавлены новые модули, которые позволяют пациенту осуществлять латеральные и ротационные движения таза, делая движение более физиологичными. Нейророботы могут оказывать значимое влияние и на состояние сердечно-сосудистой системы. Было показано, что тренировки ходьбы в устройствах, обеспечивающих поддержку тела, более безопасны для пациентов, перенесших мозговую инсульт, чем обычная ходьба ввиду меньших кардиореспираторных нагрузок [26]. При этом аналогичные тренировки для здоровых людей имеют прямо противоположный результат: обыкновенная ходьба у лиц без параличей нижних конечностей является менее

нагрузочной для сердца, чем ходьба в роботизированных тренажерах с поддержкой веса тела; вероятно, причиной этого является необходимость движения по ненатуральным траекториям и активизация нефизиологического паттерна ходьбы.

Под «вредом» для пациента можно понимать также время, которое он затрачивает на бесполезные тренировки и которое он мог бы использовать для более эффективных занятий [1]. Еще один довод противников использования РУ в нейрореабилитации – отсутствие достаточных доказательств эффективности робототехнической терапии и высокая стоимость РУ. Неясными остаются также научные предпосылки к использованию РУ (нейромоторная физиология, пластичность мозга в условиях использования робототехники) и, соответственно, оптимальные двигательные задания [27].

Соотношение «риск-польза» при применении реабилитационных РУ может быть определено лишь в клинических исследованиях. Одноцентровые исследования, проводимые на малых выборках, как пра-

Таблица 2. Реабилитационные роботизированные устройства для нижней части туловища и ног.

№	Название	Краткое описание устройства
Стационарные роботизированные устройства для реабилитации функций нижних конечностей		
1	Lokomat (Hocoma)	Роботизированное ортопедическое устройство для восстановления навыков ходьбы, оснащённое электрическим приводом, использующееся в комбинации с беговой дорожкой. Предназначено для использования пациентами с парезами и параличами нижних конечностей после травмы спинного мозга на шейном, грудном, поясничном уровне в позднем реабилитационном периоде, последствиями операций на спинном мозге и др. https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/
2	RoboGait (Bama Teknoloji)	Роботизированная реабилитационная система, используемая для восстановления и улучшения способности ходить у пациентов перенесших травмы головного или спинного мозга, инсульт, а также неврологические или ортопедические заболевания. Помогает выработать правильные двигательные паттерны в процессе реабилитации. Предназначен для лечения и реабилитации пациентов, перенесших инсульт, травмы спинного мозга, а также страдающих от ДЦП и болезни Паркинсона. http://www.bamateknoloji.com/en/products/robogait
3	InMotion Ankle (Bionik Labs)	Перспективная роботизированная система, создаваемая для реабилитации функций нижних конечностей. https://www.bioniklabs.com/news-media/press-releases/detail/32/bionik-laboratories-advances-inmotion-anklebot-into
4	Alex 3 (University of Delaware)	Роботизированное устройство для реабилитации ходьбы. Представляет собой комплекс из поддерживающей платформы и роботизированных ног. Уникальные характеристики робота обеспечивают ему 12 степеней свободы движений. http://ieeexplore.ieee.org/document/6631128/
5	GaitTrainer1 (Reha-Stim)	Стационарное роботизированное устройство с поддержкой веса тела, созданный для восстановления функции ходьбы http://www.reha-stim.de/cms/index.php?id=76
6	KineAssist (HDT Global)	Роботизированная реабилитационная система, разработанная для восстановления функций нижних конечностей, таких как ходьба и поддержание баланса. Представляет собой беговую дорожку и зафиксированного робота, который имеет специальные крепления для пациента предотвращая возможность падения http://www.hdtglobal.com/product/kineassist/
7	LOPES (University of Twente, department of biomedical engineering)	Роботизированное реабилитационное устройство для тренировки ходьбы и оценки двигательной функции пациентов перенесших инсульт. Представляет собой опорную раму с беговой дорожкой и фиксированным в ней экзоскелетом нижних конечностей. https://www.utwente.nl/en/et/be/research/projects/lopes/#staff-members-involved-in-lopes
8	Haptic Walker (Henning Schmidt)	Роботизированное реабилитационное устройство для тренировки ходьбы. Ключевой особенностью является симуляция ходьбы по неровной поверхности. Включает в себя опорную раму с подвесным механизмом и подножки с поступательным и ротационным компонентом. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1804273/
Стационарные системы для реабилитации функций нижних конечностей с поддержкой веса тела пациента		
1	SENLy (Lorenzo Bassi Luciani)	Мехатронная платформа, созданная для оценки причин падения людей, основными причинами которых являются: скольжение, опрокидывание и оступание. Включает в свою конструкцию два симметричных сектора, каждый из которых состоит из беговой дорожки, чьё полотно оборачивается вокруг плоской сенсорной поверхности. Каждая беговая дорожка представляет собой мобильную раму, с помощью которой становится возможным регулировать натяжение беговой дорожки. Дорожки фиксируются в раме с подвесным механизмом, в котором фиксируется идущий человек. Сенсоры данной системы регистрируют компоненты и моменты силы, а также ОЦМ. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3453503/
2	BAR-TM (University Rehabilitation Institute, Andrej Olenšek)	Данное устройство состоит из двух подсистем: 1 –мобильная платформа и 2 –фиксатор тела в тазовой области. Обеспечивает две степени свободы движений. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4903006/
3	ZeroG (Aretech)	Роботизированная система поддержки веса. Представляет собой комплекс из подвесного механизма и расположенной сверху дорожки. Создана для компенсации слабости и плохой координации в ранней восстановительной терапии. Данная система сконструирована таким образом, что полностью предотвращает вероятность падения пациента, благодаря чему в связи с отсутствием страха падения пациенты восстанавливаются гораздо быстрее. http://www.aretechllc.com/

4	FLOAT (Lutz Medical Engineering GmbH)	Реабилитационная система с многонаправленным поддержанием веса тела и встроенной реабилитационной программой тренировки движений. Представляет собой раму, крепящуюся к потолку и подвесной механизм для пациента. Разработана для реабилитации пациентов с болезнью Паркинсона, рассеянным склерозом, ДЦП, а также перенесших травмы головного и спинного мозга, ортопедические операции и ампутации. http://thefloat.ch/
Стационарные реабилитационные устройства для вертикализации тела		
1	Erigo (Hocoma)	Роботизированное устройство для ранней и безопасной реабилитации в виде вертикализации и мобилизации, а также кардиоваскулярной стабилизации не мобильных пациентов https://www.hocoma.com/solutions/erigo/
Мобильные реабилитационные экзоскелеты для нижней части туловища		
1	HANK (Gogoa)	Данный экзоскелет имеет шесть суставов с приводами, что позволяет проводить тренировку ходьбы на ровной поверхности. Обладает управляемыми ходьбой ассистивными алгоритмами, разработанными для реабилитации пациентов и задействующимися только в случае отклонения ходьбы пациента от предписанного движения. http://gogoa.eu/technology/the-hank-project/
2	ReWalk (ReWalk Robotics)	Носимый роботизированный экзоскелет нижних конечностей, обеспечивающий движение в тазобедренном и коленном суставах. Помогает пациентам с травмами спинного мозга стоять, ходить, поворачиваться, подниматься и спускаться по лестницам. http://rewalk.com/
3	Hal Medical (CYBERDYNE)	Роботизированный экзоскелет нижних конечностей. Служит для улучшения, поддержки и усиления функций человека. Данный экзоскелет помогает пользователю выполнять то или иное движение, добавляя к нему дополнительную силу. Кроме того может использоваться для двигательного обучения. https://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb_medical.html
4	Ekso GT (Ekso Bionics)	Экзоскелет для реабилитации пациентов перенёсших инсульт или травму спинного мозга. Разработан с целью обучения пациентов снова ходить, корректирует паттерны шага, перенос веса и потенциально смягчает компенсаторное поведение. Обладает набором датчиков и программным обеспечением, что предоставляет возможность гибкого управления, легкости в тренировках и реабилитации. http://eksobionics.com/ekshealth/products/
5	Indego (Parker Hannifin)	Обладает легким весом (около 12 кг) что позволяет с лёгкостью использовать его в клиниках и дома. Позволяет клиницистам проводить реабилитацию практически на любой ровной поверхности, включающую в себя специфические задачи ходьбы. Разработан для персонального использования, однако проходит клинические испытания в целях реабилитации пациентов с травмами спинного мозга. http://www.indego.com/
6	ExoAtlet (ExoAtlet)	Медицинский экзоскелет, который предназначен для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями нижних конечностей, наступивших в результате травм, заболеваний опорно-двигательного аппарата или нервной системы. Основные сферы его применения – это восстановление нарушенных и компенсация утраченных функций опорно-двигательного аппарата https://www.exoatlet.com/
7	ARKE (Bionik Labs)	Комплексный экзоскелет для нижней части тела, который позволяет проходить реабилитацию ходьбы у пациентов, прикованных к инвалидному креслу. Является первым экзоскелетом со встроенным в него планшетом, что обеспечивает наиболее простой способ управления и настройки. Системный интерфейс на большом беспроводном экране с тачскрином удобен в использовании и предоставляет большое количество важной информации, что помогает использовать устройство с максимальной эффективностью. https://www.bioniklabs.com/research-development/arke
8	Phoenix (SuitX, formally US Bionics)	Экзоскелет разработанный для того чтобы помочь людям с заболеваниями опорно-двигательного аппарата вставать и передвигаться. Имеет всего два привода в тазобедренных суставах, тогда как коленные суставы разработаны таким образом, чтобы обеспечивать поддержку при стоянии и достаточного расстояния конечности до поверхности при переносе. Модульная структура экзоскелета позволяет пользователю надевать и снимать каждую часть независимо. Вес составляет 12,25 кг. Легко настраиваемый для каждого конкретного пользователя. http://www.suitx.com/phoenix
9	Atlas 2030 (Marsi Bionics)	Продвинутый педиатрический экзоскелет оптимизированный для детей с серьёзными нервно-мышечными заболеваниями, такими как ДЦП, расщепление позвоночника и др. Способен самостоятельно поддерживать баланс ходьбы без необходимости использовать постороннюю помощь, например костыли или ходунки. Рассчитан на использование детьми в возрасте от 3 до 14 лет. http://www.marsibionics.com/portfolio/atlas-2030/?lang=en

10	Bionic Leg (AlterG)	Роботизированный экзоскелет нижних конечностей. Служит для увеличения силы и улучшения функционального состояния в процессе реабилитации. Помогает выполнять упражнения поражённой или ослабленной конечностью, в результате чего можно добиться большего количества повторений. Улучшает баланс в процессе реабилитации и облегчает тренировку ходьбы, вставания и подъёма по лестнице. https://www.alterg.com/products/bionic-leg/consumer
11	AxoSuit (AxoSuit)	Перспективный экзоскелет, разрабатываемый 3 университетами и 5 компаниями имеющими опыт в разработке и создании вспомогательных устройств, для определения мобильности тела, способности дотягиваться и брать предметы у пожилых людей, а также помочь им выполнять их повседневные нужды. http://www.axo-suit.eu/
12	X1 Mina Exoskeleton (NASA-IHMC)	Перспективный роботизированный экзоскелет нижних конечностей, разрабатываемый NASA Johnson Space Center и IHMC совместно. Целью разработки данного экзоскелета является создание устройства для помощи в ходьбе пациентов с различными заболеваниями, реабилитация и упражнения. http://robots.ihmc.us/x1-mina-exoskeleton/
13	REX (REX Bionics)	Робот для реабилитации, упражнений, ходьбы и стояния. Не требует дополнительных средств опоры, таких как костыли и ходунки. Новые пациенты способны начать использовать данный экзоскелет уже через несколько минут при помощи автоматического управления. Имеет функции автоматического маневрирования, такие как: ходьбы вперёд, назад, вбок и разворот. Имеет встроенную структурированную программу реабилитации и упражнений. Позволяет присесть, делать выпады, вставать, совершать махи ногой и др. Даже пациенты с серьёзными нарушениями могут использовать данное устройство. https://www.rexbionics.com/
14	GABLE (WISTIA)	Мобильная реабилитационная система с полным контролем позы пациента. Помогает поддержанию позы, совершению движений https://gablesystems.wistia.com/medias/kv5nxeq7qs
Мобильные реабилитационные тренажеры для нижней части туловища		
1	Keeogo (B-Temia)	Роботизированное устройство, разработанное для помощи ходьбе которое носиться на нижней части тела и обеспечивает необходимую поддержку при ходьбе. Данное устройство сконструировано таким образом, что позволяет совершать движения более эффективно. http://www.b-temia.com/portfolio-category/keeogo/
2	C-Brace (Ottobock)	Роботизированный ортез нижних конечностей, разработанный для лиц с проблемами движений ног в связи с частичным параличом, неполным повреждением спинного мозга, синдромом постполиомиелита, слабостью квадрицепсов а также для пациентов перенесших инсульт. Позволяет таким пациентам свободно перемещаться. https://www.ottobockus.com/orthotics/solution-overview/orthotronic-mobility-system-c-brace/
3	Stride Management Assist (Honda)	Роботизированное устройство, разработанное для помощи людям с ослабленными мышцами ног, однако, способными ходить. Моторы помогают поднимать ноги при движении вперёд и назад. Помогает пользователям проходить большие дистанции на большей скорости. Ключевыми особенностями данного устройства являются: компактность и лёгкий вес, структура крепления сходная с обычным ремнём, что позволяет легко надевать и снимать устройство, встроенная функция измерения, которая позволяет визуализировать уникальные паттерны ходьбы и статус тренировки каждого пользователя на планшетном компьютере. http://asimo.honda.com/innovations/feature/stride-management-assist/
4	Body Weight Assist (Honda)	Устройство, разработанное для дополнительной поддержки веса тела при ходьбе, поднятии и спуске по лестнице и в позиции полуприседа. Данное устройство снижает нагрузку на мышцы ног и суставов. http://asimo.honda.com/innovations/feature/stride-management-assist/
5	Exo-Legs (PhaseX AB)	Носимое роботизированное устройство для помощи пожилым людям заниматься повседневной активностью. Является не медицинским вспомогательным экзоскелетом обеспечивающим до 50% при стоянии/балансировании, вставании и ходьбе. Ключевыми особенностями являются: хорошая функциональность, легкий вес, простота использования и удобство использования в долгосрочном периоде. http://www.phasexab.com/phasexab/
6	MAXX (ETH Zurich, Sensory-Motor Systems Lab)	Перспективный мягкий и гибкий экзоскелет, обладающий малым весом и не ограничивающий движений владельца. Создаётся в целях помочь пациентам с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Будет обладать функцией помощи при необходимости, к примеру, будет помогать пациентам в совершении тех или иных движений при недостаточной силе или невозможности их самостоятельного выполнения. В своей конструкции содержит достаточное количество сенсоров оценивающих биомеханику человека и намерения к совершению того или иного движения. http://www.sms.hest.ethz.ch/research/current-research-projects/lower-limb-exoskeletons-and-exosuits/maxx-mobility-assisting-textile-exoskeleton.html

вило, демонстрируют выгоду от использования РУ в нейрореабилитации [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38], однако результаты более крупных исследований и метаанализов весьма противоречивы [39, 40]. Так, некоторые контролируемые рандомизированные исследования, основанные на большом клиническом материале, демонстрируют значительные преимущества робот-ассистируемой терапии перед традиционными способами нейрореабилитации [41, 42]. В то же время метаанализы чаще свидетельствуют о неубедительной эффективности применения роботов в реабилитации неврологических больных. Выполненный в 2008 году Кохрановский обзор, посвященный использованию роботов при тренировках паретичной руки у пациентов, перенесших инсульт, и основанный на результатах 11 исследований (328 пациентов) показал, что степень улучшения бытовой активности тех пациентов, тренировки которых проводились с помощью электромеханических устройств и роботов, не отличалась достоверно от наблюдаемой у пациентов, которые получали традиционную терапию; в то же время мышечная сила и двигательная функция паретичной руки в результате робототерапии могла улучшаться [43]. В 2012 г те же самые авторы повторно провели метаанализ, включив в него уже 19 исследований (666 пациентов) [44]; было сделано заключение, что пациенты, получавшие тренировки с помощью электромеханических устройств и роботов, с большей степенью вероятности достигали улучшения бытовой активности; функция паретичной руки (но не мышечная сила) также могла улучшаться. Эти результаты противоречат полученным ранее. Несмотря на то, что второй Кохрановский обзор можно считать более надежным из-за большего числа включенных в рассмотрение исследований и пациентов, его результаты, противоречащие результатам первого обзора, приводят в смущение [1]. Наконец, в 2015 г опубликован третий Кохрановский обзор, посвященный анализу влияния тренировок с использованием электромеханических устройств и РУ на улучшение бытовой активности пациентов, а также анализу безопасности этих тренировок [45]. В этот метаанализ было включено уже 34 рандомизированных исследования (1160 пациентов). Результаты анализа свидетельствовали о том, что у пациентов, получавших терапию с применением РУ и электромеханических устройств, могли улучшаться и бытовая активность, и мышечная сила парализованной руки, и функция верхней конечности. Однако авторы советуют с осторожностью относиться к этим результатам, поскольку сила доказательности была низкой или очень низкой, а исследования в значительной степени варьировали по характеристикам пациентов, интенсивности, продолжительности и числу тренировочных сессий [46].

В 2017 году китайскими авторами опубликован системный обзор с метаанализом тех исследований, которые проводились для оценки эффективности роботизированного обучения и обычного обучения у пациентов, перенесших инсульт, с целью улучшения двигательных функций паретичных верхних конечностей [47]. Были проанализированы данные многочисленных электронных баз за период с января 2000 года по май 2016 года, дальнейшие три метаанализа проводились по результатам 13 рандомизированных контролируемых исследований. Первый метаанализ, проведенный по данным тех исследований, где пациентам проводили тренировки с использованием РУ, показал значи-

тельное улучшение у тренируемых пациентов. Второй метаанализ показал, что улучшение функции верхней конечности (оцениваемое в баллах по результатам теста Fugl-Meyer) было значительно более выраженным при использовании РУ в сочетании с традиционной кинезотерапией в сравнении с использованием только обычной кинезотерапии. Третий мета-анализ продемонстрировал, что в хронической стадии инсульта между группами пациентов, которые получали либо только традиционную кинезотерапию, либо роботизированное лечение (в сочетании с традиционной кинезотерапией или изолированно) наблюдалась значительная разница в восстановлении движений; для острой и подострой стадий инсульта достоверных различий получено не было, хотя в группе, где проводилась роботизированная терапия, средняя оценка по шкале Fugl-Meyer была выше. Авторы делают заключение, что роботизированная терапия, по-видимому, имеет положительный эффект в отношении восстановления двигательных функций парализованной руки, причем активные тренировки могут начинаться уже на ранней стадии реабилитации; в хроническую фазу болезни РУ также могут помочь достичь лучших результатов реабилитации. Авторы рекомендуют использовать РУ в дополнение к классической кинезотерапии [47].

В системном обзоре, выполненном недавно нидерландскими исследователями, анализировался эффект роботизированной терапии на мышечную силу, мышечный тонус и функциональные возможности паретичной руки у пациентов, перенесших мозговую инсульт, а также изменение бытовой активности этих больных и безопасность тренировок [48]. В 44 исследованиях (1362 пациента) не было зарегистрировано ни одного серьезного нежелательного явления. Метаанализ, проведенный по результатам 38 рандомизированных исследований (1206 пациентов) продемонстрировал значимое, но незначительное увеличение мышечной силы и улучшение контроля паретичной руки, но в то же время – и отрицательный эффект на мышечный тонус; эффекта на функциональные возможности руки и на бытовую активность пациентов не было обнаружено. Авторы делают заключение о том, что тренировки верхней конечности с использованием РУ, вероятно, являются безопасными и позволяют увеличить число повторений упражнений и, соответственно, интенсивность нагрузок, однако не оказывают существенного положительного влияния на функциональные возможности парализованной конечности. Эффект роботизированных тренировок, начатых в первые недели после инсульта, остается неясным. Авторы обращают внимание на неадекватный дизайн большей части исследований [48].

Результаты Кохрановских обзоров, посвященных эффективности роботизированных устройств при обучении ходьбе, также противоречивы. В двух из них показано, что вероятность восстановления выше у тех пациентов, в реабилитации которых применялось электромеханическое вспоможение ходьбе в комбинации с традиционной кинезотерапией [49, 50], тогда как в другом отмечается одинаковая вероятность восстановления у пациентов, получавших тренировки на беговой дорожке с использованием роботизированного устройства и без такого использования [44].

Канадские исследователи выполнили обзор литературы, посвященной использованию роботизированных экзоскелетов для реабилитации больных,

перенесших мозговой инсульт [51]. Поиск публикаций проводился по базам данных Pubmed, OVID MEDLINE, CINAHL, Embase и Cochrane Central Register of Clinical Trials. Из 441 публикации были выбраны 11 исследований (все – за период с 2010 по 2015 г.г.), в которых имелись количественные данные о результатах тренировок ходьбы постинсультных больных с помощью экзоскелета. Число включенных в данные исследования пациентов составило 216, тренировки проводились в различные фазы заболевания, и в подострой (менее 7 недель), и в хронической (более 6 месяцев после инсульта). Семь исследований относились к пре-постклиническим, четыре – к контролируемым исследованиям; в пяти исследованиях экзоскелетное устройство применялось с одной стороны тела, в пяти поддержка была двусторонней. Продолжительность тренировок варьировала от однократной сессии до 8-недельного периода занятий. Для оценки исходов использовались такие показатели, как скорость ходьбы, результаты теста «Встань и иди» («Up and Go»), 6-минутного теста ходьбы и оценка по шкале «Функциональные категории ходьбы» («Functional Ambulation Category»). Авторы обнаружили, что лучшие результаты наблюдались в группах пациентов, которые тренировались в подострую стадию инсульта. У пациентов, находившихся в хронической стадии инсульта, в двух из четырех контролируемых исследованиях, не было выявлено различий между результатами традиционных занятий и занятий с применением РУ. Все исследования подтвердили безопасность использования экзоскелетов для тренировок ходьбы у лиц, перенесших мозговой инсульт [51]. Авторы делают вывод о необходимости проведения дальнейших контролируемых клинических исследований с целью определения оптимальных протоколов тренировок.

Израильские исследователи проанализировали ряд публикаций, посвященных тренировкам ходьбы больных после инсульта и ПСМТ с помощью экзоскелетов и роботизированных ортезов для обеспечения ходьбы с поддержкой веса тела [52]. Авторы сделали вывод, что, согласно результатам рандомизированных исследований, использование РУ в дополнение к традиционной кинезотерапии дает некоторый дополнительный положительный эффект, в основном у пациентов в подострой стадии инсульта и ПСМТ. Существенных различий между эффективностью двух названных вариантов РУ не было обнаружено [52]. Исследователи пришли также к заключению, что оптимальных тренировочных протоколов не разработано, однако, вероятно, большая продолжительность и интенсивность занятий оказывает более значительный эффект на конечный функциональный исход. Для установления оптимальных нейрореабилитационных тренировочных нагрузок необходима разработка дизайна контролируемого исследования с включением в него большого числа наблюдений [52].

Одной из причин таких разноречивых результатов мета-анализов может служить тот факт, что Кохрановские обзоры рассматривали реабилитационные электромеханические устройства и роботы как единое целое; действительно, нередко такие электромеханические системы, как Gait Trainer (Reha-Stim, Берлин, Германия), представляющей собой тредмил с поддержкой веса тел, относят к семейству роботов, хотя по сути это является ошибкой [1].

Еще одна возможная причина расхождений оценок в эффективности робототехнических подходов к ней-

рореабилитации – то, что не принимаются во внимание различия реабилитационного потенциала разных групп пациентов, тогда как задачи цели реабилитации зависят в первую очередь от исходных характеристик больных [10, 53, 54, 55]. Корректное использование новых технологий должно основываться на информации о типе пациента и фазе реабилитации; такая информация позволяет оценить потенциальную выгоду от использования специфических воздействий [49]. Например, было показано, например, что пациенты с исходно более тяжелыми двигательными нарушениями в нижних конечностях в большей степени выигрывают от применения в реабилитации роботизированных устройств, используемых в комбинации с конвенциональной кинезотерапией [53, 56]. Возможно, это происходит из-за того, что использование роботизированных устройств способствует увеличению интенсивности занятий у тяжело парализованных лиц в сравнении с применением традиционной лечебной гимнастики; в то же время пациенты с более легкой парализацией способны выполнять интенсивные нагрузки и в процессе обычных занятий кинезотерапии; для них традиционная кинезотерапия является более экологичной, дает возможность выполнять более широкий набор упражнений [57]. Важен также и психологический настрой пациента: без наличия высокой мотивации достичь эффекта от тренировок с использованием роботизированных устройств невозможно [55]. Целесообразно изучать не «насколько эффективно использование роботов в нейрореабилитации», а «какие группы пациентов выигрывают от использования роботов в нейрореабилитации» [1]. Если говорить в целом, то, вероятно, уровень ожиданий как пациентов, так и реабилитологов в отношении возможностей робототехники завышен по отношению к современным инженерным возможностям [1].

Наконец, все без исключения исследования эффективности роботов в нейрореабилитации проводились уже после коммерческого выпуска изделий, а не в процессе их создания; если проводить аналогию с разработкой новых лекарственных препаратов, такой подход представляется абсолютно неприемлемым [1]. Исследования должны предшествовать выпуску новых устройств, при этом в критериях включения в исследования должны быть обозначены характеристики пациента, в том числе – углы активных и пассивных движений в суставах, мышечная сила отдельных мышечных групп.

Перспективы разработок новых роботизированных систем для медицинской реабилитации связывают, в первую очередь, в применении технологий нейрокомпьютерных интерфейсов и виртуальной реальности для управления внешними РУ и обучения пациентов пользованию РУ [58, 59].

Экономическая эффективность робототерапии в нейрореабилитации

Серьезным препятствием широкому использованию роботов в нейрореабилитации, является экономический барьер [60]. С одной стороны, было показано, что длительное применение нейророботов способно снизить нагрузку на систему здравоохранения в части помощи тяжелым обездвиженным пациентам. Так, один кинезотерапевт может одновременно управлять четырьмя устройствами (и, соответственно, выполнять тренировки четырех пациентов) [57]. S. Masiero и со-

авторы оценивают стоимость использования робота NeReBot, предназначенного для тренировок паретичной верхней конечности у пациентов, перенесших инсульт, как 37% стоимости часа работы кинезотерапевта, при этом еще снижается продолжительность госпитализации больного [57]. Аналогичные данные приводят и S Hesse с соавторами: в том случае, если во время тренировки с использованием робота кинезотерапевт участвует лишь в ее начале и в конце, а также в тех случаях, когда требуется его помощь, то стоимость часа занятий составляет 41% от стоимости полного часа работы кинезотерапевта [61]. Однако в целом тщательные экономические исследования экономической эффективности робототерапии в нейрореабилитации являются спорадическими [60]. Такие единичные исследования указывают, что робототерапия приводит к снижению затрат здравоохранения путем уменьшения продолжительности госпитализации каждого отдельного пациента и повышения его уровня независимости в повседневной жизни при выписке. Таким образом, технологии с использованием в нейрореабилитации роботов, возможно, оправданы с экономических позиций. Тем не менее, в целом соотношение «затраты-эффект» в нейрореабилитации остается неясным [62].

Дело в том, что роботы должны не заменять, а дополнять специалистов, проводящих реабилитацию. Роботы должны являться тем инструментом в руках реабилитолога, который дает возможность пациенту выполнять более точные движения и более интенсивные нагрузки; при этом абсолютно необходим постоянный вербальный контакт между пациентом и реабилитологом с целью постоянной мотивации пациента, а также для своевременного выявления болевых ощущений, утомления, эмоционального дистресса – тех параметров, которые невозможно зарегистрировать с помощью сенсоров [24, 63]. Поэтому экономия средств за счет уменьшения участия в занятиях кинезотерапевта представляется сомнительной [1].

Этические аспекты использования роботизированных устройств в медицинской реабилитации

Тема роботов, вслед за К. Чапеком, была продолжена писателем Айзек Азимовым, который в своем научно-фантастическом рассказе «Хоровод» (вошедший затем в сборник рассказов Я-робот) впервые сформулировал Три закона робототехники [64]. Эти законы представляют собой набор фундаментальных требований к дизайну и производству роботизированных устройств, наделенных искусственным интеллектом, и предназначены для обеспечения того, чтобы роботы работали в интересах человечество, а не становились угрозой для людей. Производство роботизированных устройств с искусственным интеллектом в последние годы становится бизнесом, особенно востребованным в военных целях, а бизнес обычно мало интересуется этическими нормами [65]; в связи с этим существует угроза того, что заимствование в медицинской реабилитации устройств, изначально созданных в милитаристических целях, при отсутствии предварительно проведенной оценки их безопасности и эффективности, может наносить вред пациентам [24]. Поэтому исследователи из Клинической Лаборатории Экспериментальной Нейрореабилитации (Рим, Италия) совместно с французскими соавторами предложили переформулировать Три закона робототехники применительно к сфере медицинской реабилитации [1]:

1. Робот не может нанести вред или позволить нанести вреда пациенту.

2. Робот должен подчиняться приказам, которые дает ему осуществляющий лечение медицинский персонал, за исключением случаев, когда такие приказы будут конфликтовать с первым законом.

3. Робот должен адаптировать свое поведение к возможностям пациентов «прозрачным» (понятным, ясным) образом, до тех пор, пока это не противоречит первому или второму закону.

Для обеспечения соблюдения «Трех законов» этики необходимо соблюдение жесткие требований к безопасности роботов, определение групп пациентов, которым показано применение роботизированной реабилитации, проведение клинических исследований вновь создаваемых устройств. Разработчики медицинских РУ должны руководствоваться требованиями по безопасности медицинских роботов, регламентированными Международной организацией по стандартизации [ISO, 13482, 2014], а в нашей стране – документом ГОСТ Р 60.2.2.1–2016/ISO 13482:2014 «Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов по персональному уходу», который вступает в действие с 01.01.2018 [ГОСТ 2018]. «Идеальный» робот для нейрореабилитации должен удовлетворять ряду обязательных требований, к числу которых относятся следующие: способность помогать пациенту в выполнении определенных движений; высокая точность при выполнении запрограммированных действий; повторяемость действий; отсутствие высокой механической жесткости устройства (это делает его более безопасным для пользователя); наличие стандартизированных тренировочных сессий; наличие обратной (биологической) связи; точно контролируемая помощь; мягкое тактильное воздействие для осознания проприоцептивных сигналов; объективное и количественное измерение выполняемых пациентом движений; адаптивность [21, 22]. Обращает на себя внимание, что ни один из исследователей не указывает в качестве основного критерия идеального робота такое требование, как эффективность – возможно потому, что эффективность подразумевается как должное в случае индивидуально подобранных для конкретного пациента интенсивных, повторяемых, целенаправленных («проблемно-ориентированных») движений [1]. Последним уделяется особое внимание: конструкция нейрореабилитационных РУ должна предусматривать возможность выполнения с его помощью проблемно-ориентированных движений, то есть движений, ориентированных на выполнение конкретных задач, причем набор таких задач должен быть подобран под различные функциональные резервы пациентов [66].

«Идеальный» робот не должен снижать естественные возможности движения пациентов либо значимо искажать их. Это определяется степенями свободы движений конкретного устройства и обеспечением возможности пользователю совершать беспрепятственные движения [66]. Эффект контролируемого устройством блокирования или добавления некоторого усиления движениям человека должен быть тщательно оценен по влиянию на естественное выполнение задач; РУ должно помогать выполнению движения, но не выполнять его полностью вместо пациента [67].

Обязательной считается также наличие в РУ биологической обратной связи с предоставлением врачу и пациенту объективных, надежных показателей состояния сердечно-сосудистой и костно-мышечной систем в режиме реального времени; такая обратная связь дает возможность кинезотерапевту следить за состоянием

пациента, оценивать прогресс и вносить коррективы в режим тренировок, а самого пациента мотивирует на более активное участие в тренировках [66, 69]. Совмещённая тренировка и оценка с использованием одного и того же устройства для обеих процедур, очень важны, особенно в тех случаях, когда пациенту необходима функциональная помощь для завершения задания [70]. Для обеспечения обратной связи РУ должно иметь в своей конструкции определённый набор постоянно проводящих измерения сенсоров, которые могут быть использованы для получения данных о движении пациента; такими данными могут быть угловые показатели крупных суставов, прилагаемое усилие и пр. Измерение в процессе терапии или, например, в начале и конце сессии, могут предоставить более детальную информацию о прогрессе пациента и эффективности различных видов терапии. Существует актуальная потребность в разработке новых методов роботизированной оценки, ориентированных на клиническую потребность; во вновь создаваемых роботах обязательно должна быть предусмотрена валидизированная система количественной оценки функциональных возможностей пациента [69].

Наконец, любые вновь создаваемые нейрореабилитационные РУ должны вначале (до, а не после их коммерческого производства) проходить трехфазные клиниче-

ские испытания, по аналогии с исследованиями лекарственных препаратов [1]. При этом следует учитывать, что эффективность роботизированной терапии зависит от характеристик пациентов (тип, тяжесть и фаза заболевания, наличие специфического моторного дефицита, сопутствующая патология и пр.) [49], а также от длительности и числа тренировочных сессий [57]. Поэтому проведению клинических исследований должно предшествовать определение тех групп больных, которым показана роботизированная нейрореабилитация, а также отбор валидных методов обследования пациентов в процессе тренировок.

Заключение

Использование роботизированных устройств в комбинации с традиционной кинезотерапией является перспективным направлением в нейрореабилитации, поскольку может расширить функциональные возможности пациентов с двигательными нарушениями и дать дополнительные клинические и экономические преимущества. Создание новых эффективных поколений роботов, разработанных с учетом этических норм и достижений современной инженерии – это реальный путь к улучшению качества жизни людей с заболеваниями и травмами нервной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Iosa M., Morone G., Cherubini A., Paolucci S. The Three Laws of Neurorobotics: A Review on What Neurorehabilitation Robots Should Do for Patients and Clinicians // *J. Med. Biol. Eng.* 2016. DOI 10.1007/s40846-016-0115-2.
- Booker K.M. Historical dictionary of science fiction in literature. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield. – 2015.
- Xie Ming. Fundamental of robotics: Linking perception to action. Singapore: World Scientific // *Machine Perception and Artificial Intelligence*, – 2003. – vol. 54. – 716 p.
- Gosine R.G., Harwin W.S., Furby L.J., & Jackson R.D. An intelligent end-effector for a rehabilitation robot. // *Journal of Medical Engineering & Technology*. 1989; 13(1–2), 37–43.
- Krebs H.I., Hogan N., Aisen M.L., & Volpe B.T. Robot-aided neurorehabilitation. // *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 1998;6(1), pp.75–87.
- Aisen M.L., Krebs H.I., Hogan N., McDowell F., Volpe B.T. The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. // *Archives of Neurology*. – 1997. – 54(4). – P. 443–446.
- Hesse S., Schmidt, H. Werner, C. & Bardeleben, A. Upper and lower extremity robotic devices for rehabilitation and for studying motor control. // *Current Opinion in Neurology*, 2003;16(6),705–710.
- Veneman J.F. Kruidhof, R. Hekman, E.E. Ekkelenkamp, R. Van Asseldonk, E.H. & Van der Kooij, H. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007; 15(3), 379–386.
- Iosa M., Morone G., Fusco A., Bragioni, M. Coiro, P., Multari M., et al. Seven capital devices for the future of stroke rehabilitation. // *Stroke Research & Treatment*, 2012, 187965.
- Morone G., Rosati G., Masiero S., Poli P. Robotic Technologies and Rehabilitation: New Tools for Stroke Patients' Therapy. *BioMed Research International*. 2013; Article ID 153872, 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/153872>
- Fazekas G., Horvath M., Toth A. A novel robot training system designed to supplement upper limb physiotherapy of patients with spastic hemiparesis. // *Int J Rehabil Res.* 2006;29:251–254.
- Huang V.S., Krakauer J.W. Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective // *J. Neuroeng Rehabil.* – 2009. – Vol.6. – P. 5.
- Kalyan K. Mankala, Sai K. Banala, and Sunil K. Agrawal. Novel swing-assist un-motorized exoskeletons for gait training // *J. Neuroeng. Rehabil.* – 2009. – Vol. 6. – P. 24
- Воробьев А. А., Андрищенко Ф. А., Засыпкина О. А., Соловьева И. О., Кривоножкина П. С., Поздняков А. М. Терминология и классификация экзоскелетов // *Вестник Волгму.* – 2015. – №3 (55). – С.71–77.
- Calabrò R.S., Cacciola A., Bertè F, Manuli A, Leo A, Bramanti A, Naro A, Milardi D, Bramanti P. Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now? // *NeuroL Sci.* 2016. Apr. 37(4). P. 503–14. doi: 10.1007/s10072-016-2474-4. Epub 2016 Jan 18.
- Brewer L, Horgan F, Hickey A, Williams D. Stroke rehabilitation: recent advances and future therapies. // *QJM.* – 2013. – 106(1). – P. 11–25.
- Sabel B.A., Matzke S., Prilloff S. Special issues in brain plasticity, repair and rehabilitation: 20 years of a publishing strategy // *Restor. Neurol. Neurosci.* – 2010. – Vol. 28, №6. – P. 719–728.
- Schwartz I Sajin A, MD, Fisher I. The Effectiveness of Locomotor Therapy Using Robotic-Assisted Gait Training in Subacute Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial // *Medical Association Journal.* – 2009. – Vol. 1. – P. 516–523.
- Waldner A., Tomelleri C., Hesse S. Transfer of scientific concepts to clinical practice: recent robot assisted training studies // *Funct. Neurol.* – 2009. – №10. – P. 173–177.
- Lim P.A., Tow A.M. Recovery and regeneration after spinal cord injury: a review and summary of recent literature // *Ann. Acad. Med. Singapore*, 2007; Jan.; 36 (1): 49–57.
- Dietz V., Nef, T., & Rymer W.Z. *Neurorehabilitation technology*. 2012; London, UK: Springer.
- Belda-Lois J.M., Mena-del Horno, S., Bermejo-Bosch, I., Moreno, J. C., Pons, J. L., Farina, D., et al. Rehabilitation of gait after stroke: A review towards a top-down approach. // *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation.* – 2011. – №8 (1): 66.
- Нурманова Ш.А. Роботизированная механизированная нейрореабилитация. // *Нейрохирургия и неврология Казахстана.* – 2013. – №1 (30).
- Datteri E. Predicting the long-term effects of humanrobot interaction: A reflection on responsibility in medical robotics. // *Science and Engineering Ethics.* 2013;19(1), 139–160.
- Regnaux J.P., Saremi K., Marehbian J., Bussel B., & Dobkin B.H. An accelerometry-based comparison of 2 robotic assistive devices for treadmill training of gait. // *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 2008; 22(4), 348–354.
- Delussu A.S., Morone G., Iosa M., Bragioni M. Trallesi M. & Paolucci, S. Physiological responses and energy cost of walking on the Gait Trainer with and without body weight support in subacute stroke patients. // *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation.* 2014; 11, 54.

27. Van Der Loos, H.F. M., & Reinkensmeyer, D.J. (2008). Rehabilitation and health care robotics. In B. Siciliano & O.Khatib (Eds.), Springer Handbook of Robotics. – Berlin: Springer, 2008. – pp. 1223–1251.
28. Takahashi C.D., Der-Yeghian L., Le V., Motiwala R.R., Cramer S.C. Robot-based hand motor therapy after stroke. *Brain*. 2008; 131:425–437.
29. 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; Proc IEEE Int Conf Rehabil Robot; 2011; pp. 870–877. <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975468>
30. Даминов В.Д., Рыбалко Н.В., Горохова И.Г., Короткова И.С., Кузнецов А.Н. Реабилитация больных в остром периоде ишемического инсульта с применением роботизированной системы «Erigo» // Вестник восстановительной медицины. – 2008. – № 6. – С.50–53.
31. Tsukahara A., Kawanishi R., Hasegawa Y., Sankai Y. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit HAL. *Adv Robot*. 2010; 24: 1615–1638. <http://dx.doi.org/10.1163/016918610X512622>.
32. Otaka E., Otaka Y., Kasuga S., Nishimoto A., Yamazaki K., Kawakami M., Ushiba J., Liu M. Clinical usefulness and validity of robotic measures of reaching movement in hemiparetic stroke patients. // *J. Neuroeng Rehabil*. 2015; Aug 12; 12:66. doi: 10.1186/s12984-015-0059-8.
33. Черникова Л.А., Демидова А.Е., Домашенко М.А. Эффект применения роботизированных устройств («Эриго» и «Локомат») в ранние сроки после ишемического инсульта // Вестник Восстановительной медицины. – 2008. – № 5. – С. 73–75.
34. Зиминова Е.В. Медицинская реабилитация больных с применением роботизированной реконструктивной ходьбы в первые месяцы после травмы спинного мозга: автореф. дис. ...канд. биол. наук. – Москва, 2010. – 40 с.
35. Сидякина И.В. Эффективность и безопасность ранней аппаратной вертикализации при тяжелом и крайне тяжелом инсульте // Вестник восстановительной медицины. – 2011. – №4. – С. 2–5.
36. Романенкова Ю.С., Кузьмина Т.И., Кызымко М.И., Сафоничева М.А. Нейрореабилитация пациентов с инсультом в вертебро-базиллярном бассейне при помощи роботизированных аппаратов. // Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная физкультура, курортология и физиотерапия. – 2016. – № 8 (30).
37. Nam K.Y., Kim H.J., Kwon B.S., Park J.W., Lee H.J., Yoo A. Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. // *J Neuroeng Rehabil*. 2017; Mar 23;14(1):24. doi: 10.1186/s12984-017-0232-3.
38. Chisholm A.E., Alamo R.A., Williams A.M., Lam T. Overground vs. treadmill-based robotic gait training to improve seated balance in people with motor-complete spinal cord injury: a case report. // *J Neuroeng Rehabil*. 2017; Apr 11;14(1):27. doi: 10.1186/s12984-017-0236-z.
39. Hidler J., Nichols D., Pelliccio M., Brady K., Campbell D.D., Kahn J.H., et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke. // *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2009;23, 5–13.
40. Husemann B., Müller F., Krewer C., Heller S., Koenig E. Effects of locomotion training with assistance of a robot-driven gait orthosis in hemiparetic patients after stroke // *Stroke*, 2007; 38: 349–DOI:10.1161/01.STR.00000254607.48765.cb.
41. Lo A.C., Guarino P.D., Richards L.G., Haselkorn J.K., Wittenberg G F., & Federman, D.G. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. // *The New England Journal of Medicine*, 2010;362(19), 1772–1783.
42. Klamroth-Marganska V., Blanco J., Campen K., Curt A., Dietz V., Ettiin T., et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: A multicentre, parallel-group randomised trial. // *Lancet Neurology*. 2014;13(2),159–166.
43. Mehrholz J., Platz T., Kugler J., Pohl M. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2008; 8(4):CD006876.
44. Mehrholz J., Pohl M., Elsner B. Treadmill training and body weight support for walking after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2014; 1:CD002840.
45. Mehrholz J., Pohl M., Platz T., Kugler J., Elsner B. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015, Nov 7;(11):CD006876. doi: 10.1002/14651858.CD006876.pub4.
46. Mehrholz J., Hadrich A., Platz T., Kugler J., Pohl M. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving generic activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2012; 6:CD006876.
47. Zhang C., Li-Tsang C.W., Au R.K. Robotic approaches for the rehabilitation of upper limb recovery after stroke: a systematic review and meta-analysis. *Int J. Rehabil Res*. 2017 Mar; 40(1):19–28. doi: 10.1097/MRR.0000000000000204.
48. Veerbeek J.M., Langbroek-Amersfoort A.C., van Wegen E.E., Meskers CG, Kwakkel G. Effects of Robot-Assisted Therapy for the Upper Limb After Stroke. // *Neurorehabil Neural Repair*. 2017; Feb;31(2):107–121. doi: 10.1177/1545968316666957. Epub 2016 Sep 24.
49. Mehrholz J., Werner C., Kugler J., Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2007, Issue 4. Art. No.: CD006185. DOI: 10.1002/14651858.CD006185.pub2.
50. Mehrholz J., Elsner B., Werner C., Kugler J., Pohl, M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2013; 7:CD006185.
51. Louie D.R., Eng J.J. Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait: a scoping review. // *J. Neuroeng Rehabil*. 2016 Jun 8;13(1):53. doi: 10.1186/s12984-016-0162-5.
52. Schwartz I., Meiner Z. Robotic-assisted gait training in neurological patients: who may benefit? // *Ann Biomed Eng*. 2015; May; 43(5):1260–9. doi: 10.1007/s10439-015-1283-x.
53. Morone G., Bragoni M., Iosa M., De Angelis, D., Venturiero, V., Coiro P., et al. Who may benefit from robotic-assisted gait training? A randomized clinical trial in patients with subacute stroke. // *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 2011; 25(7),636–644.
54. Bragoni M., Broccoli M., Iosa M., Morone G., De Angelis D., Venturiero V., et al. Influence of psychologic features on rehabilitation outcomes in patients with subacute stroke trained with robotic-aided walking therapy. // *American Journal of Physical & Medicine Rehabilitation*. – 2013. – 92(10 Suppl 2). – P. 16–25.
55. Iosa M., Morone G., Bragoni M., De Angelis D., Venturiero V., Coiro P., et al. Driving electromechanically assisted Gait Trainer for people with stroke. // *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2011,48(2), 135–146.
56. Morone G., Iosa M., Bragoni M., De Angelis D., Venturiero V., Coiro P., et al. (2012). Who may have durable benefit from robotic gait training?: A 2-year follow-up randomized controlled trial in patients with subacute stroke. *Stroke*, 43(4), 1140–1142.
57. Masiero S., Poli P., Rosati G., Zanonetto D., Iosa M., Paolucci S., et al. The value of robotic systems in stroke rehabilitation. // *Expert Review of Medical Devices*, 2014;11(2), 187–198.
58. Bouton C.E., et al., Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia. *Nature*, 2016.
59. Collinger J.L., et al., High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *Lancet*, 2013. 381(9866): 557–64.
60. Turchetti G., Vitiello N., Trieste L., Romiti S., Geisler E., & Micera S. Why effectiveness of robot-mediated neurorehabilitation does not necessarily influence its adoption. // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2014; 7, 143–153.
61. Hesse S., Heß A., Werner C., Kabbert N., & Buschfort R. Effect on arm function and cost of robot-assisted group therapy in subacute patients with stroke and a moderately to severely affected arm: A randomized controlled trial. // *Clinical Rehabilitation*. – 2014. – №28(7), pp. 637–647.
62. Wagner, T.H., Lo, A.C., Peduzzi P., Bravata D.M., Huang G.D., Krebs H.I., et al. An economic analysis of robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. // *Stroke*, 2011; 42(9), 2630–2632.
63. Morone G., Masiero S., Werner C., & Paolucci S. Advances in neuromotor stroke rehabilitation. // *Biomed Research International*, 2014; 236043.
64. Asimov I.I. Robot. / New York, NY: Gnome Press, 1951.
65. Sawyer R.J. Robot ethics. // *Science*, 2007; 318(5853), 1037.
66. Fazekas G., Tavaszi I., Tóth A. New opportunities in neuro-rehabilitation: robot mediated therapy in conditions post central nervous system impairments. *Ideggyogy Sz*. 2016 Mar 30;69(5–6):148–54.
67. Pennycott A., Wyss D., Vallery H., Klamroth-Marganska V., Riener R. Towards more effective robotic gait training for stroke rehabilitation: a review. // *J. Neuroeng Rehabil*. 2012; 9(1):1. doi: 10.1186/1743-0003-9-65.
68. Emken J.L., Benitez R., Reinkensmeyer D.J. Human-robot cooperative movement training: learning a novel sensory motor transformation during walking with robotic assistance-as-needed. // *J Neuroeng Rehabil*. 2007;4(1):1. doi: 10.1186/1743-0003-4-8.
69. Keller U., Scho-lich S., Albisser U., Rudhe C., Curt A., Riener R., & Klamroth-Marganska, V. (2015). Robot-assisted arm assessments in spinal cord injured patients: A consideration of concept study. *PLoS ONE*, 10(5), e0126948.
70. Maggioni S., Melendez-Calderon A., van Asseldonk E., Klamroth-Marganska V., Lünenburger L., Riener R., van der Kooij H. Robot-aided assessment of lower extremity functions: a review. // *J. Neuroeng Rehabil*. 2016; Aug 2;13(1):72. doi: 10.1186/s12984-016-0180-3.
71. Shirota C., van Asseldonk E., Matjačić Z., Vallery H., Barralon P., Maggioni S., Buurke J.H., Venemancorresponding J.F. Robot-supported assessment of balance in standing and walking // *J Neuroeng Rehabil*. 2017; 14: 80. doi: 10.1186/s12984-017-0273-7.

REFERENCES

- Iosa M., Morone G., Cherubini A., Paolucci S. The Three Laws of Neurorobotics: A Review on What Neurorehabilitation Robots Should Do for Patients and Clinicians // *J. Med. Biol. Eng.* 2016. DOI 10.1007/s40846-016-0115-2.
- Booker K.M. Historical dictionary of science fiction in literature. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield. – 2015.
- Xie Ming. Fundamental of robotics: Linking perception to action. Singapore: World Scientific // *Machine Perception and Artificial Intelligence*, – 2003. – vol. 54. – 716 p.
- Gosine R.G., Harwin, W.S., Furby, L.J., & Jackson, R.D. An intelligent end-effector for a rehabilitation robot. // *Journal of Medical Engineering & Technology*. 1989; 13(1–2), 37–43.
- Krebs, H.I., Hogan N., Aisen M.L., & Volpe, B.T. Robot-aided neurorehabilitation. // *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 1998;6(1), pp.75–87.
- Aisen M. L., Krebs H.I., Hogan N., McDowell F., Volpe B.T. The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. // *Archives of Neurology*. – 1997. – 54(4). – P. 443–446.
- Hesse S., Schmidt H., Werner C., & Bardeleben A. Upper and lower extremity robotic devices for rehabilitation and for studying motor control. // *Current Opinion in Neurology*, 2003;16(6),705–710.
- Veneman J.F., Kruidhof R., Hekman E.E., Ekkelenkamp, R. Van Asseldonk, E.H., & Van der Kooij, H. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007; 15(3), 379–386.
- Iosa M., Morone G., Fusco A., Bragioni M., Coiro P., Multari M., et al. Seven capital devices for the future of stroke rehabilitation. // *Stroke Research & Treatment*, 2012, 187965.
- Morone G., Rosati G., Masiero S., Poli P. Robotic Technologies and Rehabilitation: New Tools for Stroke Patients' Therapy. *BioMed Research International*. 2013; Article ID 153872, 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/153872>
- Fazekas G., Horvath M., Toth A. A novel robot training system designed to supplement upper limb physiotherapy of patients with spastic hemiparesis. // *Int J Rehabil Res.* 2006;29:251–254.
- Huang V.S., Krakauer J.W. Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective // *J. Neuroeng Rehabil.* – 2009. – Vol.6. – P. 5.
- Kalyan K. Mankala, Sai K. Banala, and Sunil K. Agrawal. Novel swing-assist un-motorized exoskeletons for gait training // *J. Neuroeng. Rehabil.* – 2009. – Vol. 6. – P. 24
- Vorob'ev A.A., Andrjushenko F.A., Zasyapkina O.A., Solov'eva I.O., Krivonozhkina P.S., Pozdnjakov A.M. Terminologija i klassifikacija jekzoskeletov // *Vestnik Volgmu.* – 2015. – №3 (55). – S.71–77.
- Calabrò R.S., Cacciola A., Bertè F, Manuli A., Leo A., Bramanti A., Naro A., Milardi D., Bramanti P. Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now? // *Neurol Sci.* 2016. Apr. 37(4). P. 503–14. doi: 10.1007/s10072-016-2474-4. Epub 2016 Jan 18.
- Brewer L., Horgan F., Hickey A., Williams D. Stroke rehabilitation: recent advances and future therapies. // *QJM.* – 2013. – 106(1). – P. 11–25.
- Sabel B.A., Matzke S., Prilloff S. Special issues in brain plasticity, repair and rehabilitation: 20 years of a publishing strategy // *Restor. Neurol. Neurosci.* – 2010. - Vol.28, №6. - P. 719–728.
- Schwartz I., Sajin A., MD, Fisher I. The Effectiveness of Locomotor Therapy Using Robotic-Assisted Gait Training in Subacute Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial // *Medical Association Journal.* - 2009. - Vol. 1. - P. 516–523.
- Waldner A., Tomelleri C., Hesse S. Transfer of scientific concepts to clinical practice: recent robot assisted training studies // *Funct. Neurol.* - 2009. - №10. - P. 173–177.
- Lim P. A., Tow A.M. Recovery and regeneration after spinal cord injury: a review and summary of recent literature // *Ann. Acad. Med. Singapore*, 2007; Jan.; 36 (1): 49–57.
- Dietz V., Nef T., & Rymer W.Z. Neurorehabilitation technology. 2012; London, UK: Springer.
- Belda-Lois J.M., Mena-del Horno S., Bermejo-Bosch I., Moreno J.C., Pons J.L., Farina D., et al. Rehabilitation of gait after stroke: A review towards a top-down approach. // *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation*. – 2011. – №8 (1): 66.
- Nurmanova Sh.A. Robotizirovannaja mehanizirovannaja nejrореабилитacija. // *Nejrohirurgija i nevrologija Kazahstana.* – 2013. – №1 (30).
- Datteri E. Predicting the long-term effects of humanrobot interaction: A reflection on responsibility in medical robotics. // *Science and Engineering Ethics*. 2013;19(1), 139–160.
- Regnaud J. P., Saremi K., Marehbian J., Bussell B., & Dobkin B.H. An accelerometry-based comparison of 2 robotic assistive devices for treadmill training of gait. // *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 2008; 22(4), 348–354.
- Delussu A.S., Morone G., Iosa M., Bragioni M., Traballes, M., & Paolucci, S. Physiological responses and energy cost of walking on the Gait Trainer with and without body weight support in subacute stroke patients. // *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation*. 2014; 11, 54.
- Van Der Loos, H.F. M., & Reinkensmeyer, D.J. (2008). Rehabilitation and health care robotics. In B. Siciliano & O.Khatib (Eds.), *Springer Handbook of Robotics*. – Berlin: Springer, 2008. – pp. 1223–1251.
- Takahashi C.D., Der-Yeghiaian L., Le V., Motiwala R. R., Cramer S.C. Robot-based hand motor therapy after stroke. *Brain*. 2008; 131:425–437.
- Neuhaus PD, Noorden JH, Craig TJ, Torres T, Kirschbaum J, Pratt JE. Design and evaluation of Mina: A robotic orthosis for paraplegics; *Proc IEEE Int Conf Rehabil Robot*; 2011; pp. 870–877. <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975468>
- Daminov V.D., Rybalko N.V., Gorohova I.G., Korotkova I.S., Kuznecov A.N. Reabilitacija bol'nyh v ostrom periode ishemiceskogo insulta s primeneniem robotizirovannoj sistemy «Erigo» // *Vestnik vosstanovitel'noj mediciny.* - 2008. - № 6. - C.50–53.
- Tsukahara A., Kawanishi R, Hasegawa Y, Sankai Y. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit HAL. *Adv Robot.* 2010; 24: 1615–1638. <http://dx.doi.org/10.1163/016918610X512622>.
- Otaka E., Otaka Y., Kasuga S., Nishimoto A., Yamazaki K., Kawakami M., Ushiba J., Liu M. Clinical usefulness and validity of robotic measures of reaching movement in hemiparetic stroke patients. // *J. Neuroeng Rehabil.* 2015; Aug 12; 12:66. doi: 10.1186/s12984-015-0059-8.
- Chernikova L.A., Demidova A.E., Domashenko M.A. Jеffekt primenenija robotizirovannyh ustrojstv ("Jerigo" i "Lokomat") v rannie sroki posle ishemiceskogo insulta // *Vestnik Vosstanovitel'noj mediciny.* – 2008. – № 5. – S. 73–75.
- Zimina E.V. Medicinskaja reabilitacija bol'nyh s primeneniem robotizirovannoj rekonstrukcii hod'by v pervye mesjacy posle travmy spinnoego mozga: avtořef. dis. ...kand. biol. nauk. – Moskva, 2010. – 40 s.
- Sidjakina I.V. Jеffektivnost' i bezopasnost' rannej apparatnoj vertikalizacii pri tjazhelom i krajne tjazhelom insulte // *Vestnik vosstanovitel'noj mediciny.* – 2011. – №4. – S. 2–5.
- Romanenkova Ju.S., Kuz'minova T.I., Kyzymko M.I., Safonicheva M.A. Nejrореабилитacija pacientov s insultom v vertebro-baziljarnom bassejne pri pomoshhi robotizirovannyh apparatov. // *Vosstanovitel'naja medicina, sportivnaja medicina, lechebnaja fizkul'tura, kurortologija i fizioterapija.* – 2016. – № 8 (30).
- Nam K.Y., Kim H.J., Kwon B.S., Park J.W., Lee H.J., Yoo A. Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. // *J Neuroeng Rehabil.* 2017; Mar 23;14(1):24. doi: 10.1186/s12984-017-0232-3.
- Chisholm A.E., Alamro R.A., Williams A.M., Lam T. Overground vs. treadmill-based robotic gait training to improve seated balance in people with motor-complete spinal cord injury: a case report. // *J Neuroeng Rehabil.* 2017; Apr 11;14(1):27. doi: 10.1186/s12984-017-0236-z. Asimov, I. I Robot. / New York, NY: Gnome Press, 1951.
- Hidler J., Nichols D., Pelliccio M., Brady K., Campbell D.D., Kahn J. H., et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke. // *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2009;23, 5–13.
- Husemann B., Müller F., Krewer C., Heller S., Koenig E. Effects of locomotion training with assistance of a robot-driven gait orthosis in hemiparetic patients after stroke // *Stroke*, 2007; 38: 349–DOI:10.1161/01.STR.0000254607.48765.cb.
- Lo A.C., Guarino P.D., Richards L.G., Haselkorn J.K., Wittenberg G.F., & Federman D.G. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. // *The New England Journal of Medicine*, 2010;362(19), 1772–1783.
- Klamroth-Marganska V., Blanco J., Campen K., Curt A., Dietz V., Ertl T., et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: A multicentre, parallel-group randomised trial. // *Lancet Neurology*. 2014;13(2),159–166.
- Mehrholtz J., Platz T., Kugler J., Pohl M. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2008; 8(4):CD006876.
- Mehrholtz J., Pohl M., Elsner B. Treadmill training and body weight support for walking after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2014; 1:CD002840.
- Mehrholtz J., Pohl M., Platz T., Kugler J., Elsner B. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015, Nov 7;(11):CD006876. doi: 10.1002/14651858.CD006876.pub4.
- Mehrholtz J., Hadrich A., Platz T., Kugler J., Pohl M. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving generic activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2012; 6:CD006876.
- Zhang C., Li-Tsang C.W., Au R.K. Robotic approaches for the rehabilitation of upper limb recovery after stroke: a systematic review and meta-analysis. *Int J Rehabil Res.* 2017 Mar; 40(1):19–28. doi: 10.1097/MRR.000000000000204.

48. Veerbeek J.M., Langbroek-Amersfoort A.C., van Wegen E.E., Meskers C.G., Kwakkel G. Effects of Robot-Assisted Therapy for the Upper Limb After Stroke. //Neurorehabil Neural Repair. 2017; Feb;31(2):107–121. doi: 10.1177/1545968316666957. Epub 2016 Sep 24.
49. Mehrholz J., Werner C., Kugler J., Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. Cochrane Database Syst Rev. 2007, Issue 4. Art. No.: CD006185. DOI: 10.1002/14651858.CD006185.pub2.
50. Mehrholz J., Elsner B., Werner C., Kugler J., Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. The Cochrane Database of Systematic Reviews. 2013; 7:CD006185.
51. Louie D.R., Eng J.J. Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait: a scoping review. //J. Neuroeng Rehabil. 2016 Jun 8;13(1):53. doi: 10.1186/s12984-016-0162-5.
52. Schwartz I, Meiner Z. Robotic-assisted gait training in neurological patients: who may benefit? //Ann Biomed Eng. 2015; May; 43(5):1260–9. doi: 10.1007/s10439-015-1283-x.
53. Morone G., Bragoni M., Iosa M., De Angelis D., Venturiero V., Coiro P., et al. Who may benefit from robotic-assisted gait training? A randomized clinical trial in patients with subacute stroke. //Neurorehabilitation & Neural Repair, 2011; 25(7),636–644.
54. Bragoni M., Broccoli M., Iosa M., Morone G., De Angelis D., Venturiero V., et al. Influence of psychologic features on rehabilitation outcomes in patients with subacute stroke trained with robotic-aided walking therapy. // American Journal of Physical & Medicine Rehabilitation. – 2013. – 92(10 Suppl 2). – P. 16–25.
55. Iosa M., Morone G., Bragoni M., De Angelis D., Venturiero V., Coiro P., et al. Driving electromechanically assisted Gait Trainer for people with stroke. //Journal of Rehabilitation Research and Development, 2011,48(2), 135–146.
56. Morone G., Iosa M., Bragoni M., De Angelis D., Venturiero V., Coiro P., et al. (2012). Who may have durable benefit from robotic gait training?: A 2-year follow-up randomized controlled trial in patients with subacute stroke. Stroke, 43(4), 1140–1142.
57. Masiero S., Poli P., Rosati G., Zanutto D., Iosa M., Paolucci S., et al. The value of robotic systems in stroke rehabilitation. //Expert Review of Medical Devices, 2014;11(2), 187–198.
58. Bouton C.E., et al., Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia. Nature, 2016.
59. Collinger J.L., et al., High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. Lancet, 2013. 381(9866): 557–64.
60. Turchetti G., Vitiello N., Trieste L., Romiti S., Geisler E., & Micera S. Why effectiveness of robot-mediated neurorehabilitation does not necessarily influence its adoption. //IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2014; 7, 143–153.
61. Hesse S., Heß A., Werner C., Kabbert N., & Buschfort R. Effect on arm function and cost of robot-assisted group therapy in subacute patients with stroke and a moderately to severely affected arm: A randomized controlled trial. //Clinical Rehabilitation. – 2014. – №28(7), pp. 637–647.
62. Wagner T.H., Lo A.C., Peduzzi P., Bravata D. M., Huang G.D., Krebs H.I., et al. An economic analysis of robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. //Stroke, 2011; 42(9), 2630–2632.
63. Morone G., Masiero S., Werner C., & Paolucci S. Advances in neuromotor stroke rehabilitation. //Biomed Research International, 2014; 236043.
64. Asimov I.I. Robot. / New York, NY: Gnome Press, 1951.
65. Sawyer R.J. Robot ethics. //Science, 2007; 318(5853), 1037.
66. Fazekas G., Tavaszi I., Tóth A. New opportunities in neuro-rehabilitation: robot mediated therapy in conditions post central nervous system impairments. Ideggogy Sz. 2016 Mar 30;69(5–6):148–54.
67. Pennycott A., Wyss D., Vallery H., Klamroth-Marganska V., Riener R. Towards more effective robotic gait training for stroke rehabilitation: a review. //J. Neuroeng Rehabil. 2012; 9(1):1. doi: 10.1186/1743-0003-9-65.
68. Emken J.L., Benitez R., Reinkensmeyer D.J.. Human-robot cooperative movement training: learning a novel sensory motor transformation during walking with robotic assistance-as-needed. // J Neuroeng Rehabil. 2007;4(1):1. doi: 10.1186/1743-0003-4-8.
69. Keller U., Scho'lich S., Albißer U., Rudhe C., Curt A., Riener R., & Klamroth-Marganska, V. (2015). Robot-assisted arm assessments in spinal cord injured patients: A consideration of concept study. PLoS ONE, 10(5), e0126948.
70. Maggioni S., Melendez-Calderon A., van Asseldonk E., Klamroth-Marganska V., Lünenburger L., Riener R., van der Kooij H. Robot-aided assessment of lower extremity functions: a review. //J. Neuroeng Rehabil. 2016; Aug 2;13(1):72. doi: 10.1186/s12984-016-0180-3.
71. Shirota C., van Asseldonk E., Matjačić Z., Vallery H., Barralon P., Maggioni S., Buurke J.H., Venemancorresponding J.F. Robot-supported assessment of balance in standing and walking //J Neuroeng Rehabil. 2017; 14: 80. doi: 10.1186/s12984-017-0273-7.

РЕЗЮМЕ

Использование роботизированных устройств (РУ) в комбинации с традиционной кинезотерапией является перспективным направлением реабилитации неврологических пациентов, имеющих выраженные двигательные нарушения. В статье рассмотрены классификации РУ, используемых в целях восстановительного лечения, даны краткие сведения о тех средствах робототехники, которые производятся в настоящее время. Представлены сведения о преимуществах и рисках робот-ассистируемой терапии в сравнении с традиционными способами нейрореабилитации. Приведены результаты метаанализов и рандомизированных исследований, посвященных клинической эффективности применения РУ, рассмотрены вопрос экономической эффективности робототерапии. Особое внимание уделено этическим аспектам разработки новых реабилитационных РУ и требованиям к «идеальному» нейрореабилитационному роботу.

Ключевые слова: нейрореабилитация, роботизированные устройства, экзоскелеты.

ABSTRACT

The use of robotic devices (RD) in combination with traditional kinesitherapy is a promising direction in the rehabilitation of neurological patients with severe motor impairment. The classifications of RD used for restorative treatment as well as brief information on the RD that are currently produced are reviewed in this article. Information about benefits and risks of robot-assisted therapy in comparison with traditional methods of neurorehabilitation is presented. The results of meta-analysis and randomized studies devoted to the clinical effectiveness of the RD application are discussed. Moreover, the question of the economic efficiency of robot therapy is considered. Particular attention is paid to the ethical aspects of the development of new rehabilitation facilities and requirements for an "ideal" neurorehabilitation robot.

Keywords: neurorehabilitation, robotic device, exoskeleton.

Контакты:

Рукина Н.Н. E-mail: ruginann@mail.ru