

ЭКЗОСКЕЛЕТ КАК НОВОЕ СРЕДСТВО В АБИЛИТАЦИИ И РЕАБИЛИТАЦИИ ИНВАЛИДОВ (ОБЗОР)

УДК 616–036.865–036.85–77

Поступила 25.02.2015 г.

- © **А.А. Воробьев**, д.м.н., профессор, зав. кафедрой оперативной хирургии и топографической анатомии¹, руководитель отдела экспериментальной и клинической хирургии²;
А.В. Петрухин, к.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования³;
О.А. Засыпкина, к.м.н., старший преподаватель кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии¹, младший научный сотрудник лаборатории моделирования патологии²;
П.С. Кривоножкина, ассистент кафедры детских болезней педиатрического факультета с курсом детской неврологии¹;
А.М. Поздняков, к.м.н., доцент кафедры медицинской реабилитации и спортивной медицины с курсом медицинской реабилитации, лечебной физкультуры, спортивной медицины, физиотерапии ФУВ¹

¹Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, 400131, пл. Павших Борцов, 1;²Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, 400131, пл. Павших Борцов, 1;³Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005, пр. Ленина, 28

По данным отечественной и зарубежной литературы проанализировано состояние проблемы разработки и внедрения экзоскелетов. Показано, что в настоящее время приоритетными областями применения экзоскелетов являются военная промышленность и реабилитационная медицина. Отмечено, что большинство созданных экзоскелетов не могут найти массового применения в реабилитации больных с ограничением функций верхних и нижних конечностей из-за большой массы конструкции, зависимости от источников внешнего питания, значительной стоимости. Рассмотрены особенности двух видов экзоскелетов: активного и пассивного. Показано, что наиболее приемлема для использования конструкция пассивного экзоскелета. Отмечено, что основные группы нуждающихся в экзоскелетах состоят из пациентов, страдающих парезами верхних и нижних конечностей.

Ключевые слова: пассивный экзоскелет; активный экзоскелет; парез; инвалид.

English

Exoskeleton as a New Means in Habilitation and Rehabilitation of Invalids (Review)

- A.A. Vorobyev**, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy¹, Head of the Department of Experimental and Clinical Surgery²;
A.V. Petrukhin, PhD, Assistant Professor, Department of Computer-Aided Design and Search Engineering³;
O.A. Zasyapkina, PhD, Senior Tutor, Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy¹, Junior Researcher, Laboratory of Pathology Simulation²;
P.S. Krivonozhkina, Assistant, Department of Children Diseases, Pediatric Faculty with the Course of Pediatric Neurology¹;
A.M. Pozdnyakov, PhD, Assistant Professor, Department of Medical Rehabilitation and Sports Medicine with the Course of Medical Rehabilitation, Exercise Therapy, Sports Medicine, Physiotherapy, Postgraduate Faculty¹

¹Volgograd State Medical University, 1 Pavshikh Bortzov Square, Volgograd, 400131, Russian Federation;²Volgograd Medical Science Center, 1 Pavshikh Bortzov Square, Volgograd, 400131, Russian Federation;³Volgograd State Technical University, 28 Prospekt Lenina, Volgograd, 400005, Russian Federation

The problem of development and implementation of exoskeletons has been analyzed on the basis of the Russian and foreign literature. Military industry and rehabilitation medicine are shown to be currently the priority fields of exoskeleton application. It has been noted, that the majority of the existing exoskeletons cannot be widely used for the rehabilitation of the patients with limited functions of the upper and lower limbs because they are heavy, external power supply-dependent, and expensive. Two types of exoskeletons, active and passive, have been considered. The design of the passive exoskeleton is shown to be most acceptable for use. The analysis has revealed, that the main groups requiring exoskeletons, include patients suffering from paresis of the upper and lower limbs.

Key words: passive exoskeleton; active exoskeleton; paresis; invalid.

Для контактов: Воробьев Александр Александрович, e-mail: cos@volgmed.ru

Экзоскелет (от греч. *ἔξω* — внешний и *σκελετός* — скелет) — устройство, предназначенное для увеличения силы человека за счет внешнего каркаса [1, 2].

Существуют модели экзоскелетов с активным и пассивным принципом работы — активные и пассивные экзоскелеты. Активные модели используют в качестве источника энергии внешние устройства, тогда как механика пассивных экзоскелетов основана на использовании кинетической энергии и силы человека.

Активные экзоскелеты нашли широкое применение в военных целях, однако из-за секретности разработок особенности их конструкций невозможно проанализировать. Максимальное количество таких разработок приходится на Пентагон. Один из известных экзоскелетов *HULC* (Lockheed Martin, США) позволяет солдату быстро перемещаться с грузом по пересеченной местности, при этом отмечается высокая скорость перемещения. *HULC* помогает не только переносить, но и поднимать груз с земли. Масса устройства — 25 кг, большая ее часть приходится на батареи, заряда батарей хватает на пару часов. Конструкция экзоскелета увеличивает массу снаряжения солдата на 25 кг. Эксплуатация устройства ограничивается климатическими условиями — высокой и низкой температурами. Обслуживание и ремонт *HULC* могут проводить только специалисты [3, 4].

Экзоскелет XOS (Sarcos, США) представляет собой специализированный костюм, предназначенный для военнослужащих полевых подразделений. Его существенный недостаток — конструкция требует постоянной связи с источником энергии. Масса конструкции — 70 кг, что также ограничивает его применение [5–7]. Оба описанных экзоскелета направлены на увеличение выносливости, силы как верхних, так и нижних конечностей у здоровых людей, в данном случае — военных.

В ряде стран разработка активных экзоскелетов является темой социальных проектов. В их задачу входит восполнение утраченных функций и осуществление физической и социальной реабилитации пациентов. Примером могут служить экзоскелеты *ReWalk*, *REX*, *HAL*, *eLEGS*, конструктивные особенности которых направлены на помощь людям, имеющим сложности в передвижении.

Экзоскелет ReWalk (ARGO Medical Technologies, Израиль) — позволяет людям с параличом нижней половины тела (нижний парапарез) вставать на ноги и ходить, опираясь на палки. Работа конструкции основана на датчиках, улавливающих наклон тела вперед и передающих сигнал к поддерживающим ноги приборам. Цена аппарата — 100 тыс. долл. США. Питание осуществляется от аккумулятора, размещенного в специальном рюкзаке за спиной. Применение конструкции возможно только у лиц с сохраненными функциями верхних конечностей [8–10].

REX (REX Bionics, Новая Зеландия) — обеспечивает дополнительную поддержку тела человека в пространстве при перемещении. Управление осуществляется при помощи джойстика и планшета. Масса экзоскелета — 38 кг, что вместе с высокой себестоимос-

тью — 150 тыс. долл. США — делает его недоступным для массового применения [11].

HAL — Hybrid Assistive Limb (Cyberdyne, Япония) — предназначен для пожилых людей и инвалидов, испытывающих затруднения в передвижении. Общая масса конструкции — 23 кг, высота — 160 см. Кроме того, аккумуляторная батарея весит 10 кг, а время автономной работы (в условиях максимальной нагрузки) составляет 2,5 ч. Стоимость изделия — 4200 долл. США [12].

eLEGS (Ekso Bionics, США) — специальный гидравлический экзоскелет, предназначенный для пациентов с частично парализованными нижними конечностями. Конструкция позволяет им передвигаться с помощью костылей или специальных ходунков. В основе работы — интерфейс-аппаратно-программный комплекс, который использует естественное человеческое движение, чтобы безопасно перевести его в действие экзоскелета с помощью микрокомпьютера [13, 14].

Примером активного экзоскелета верхней конечности является проект студентов-инженеров из Университета Пенсильвании — это фрагмент экзоскелета *Titan Arm*. Конструкция компактна, дешева в производстве (элементы экзоскелета напечатаны на 3D-принтере). Система питается от аккумуляторов, которые крепятся на спине, и приводится в действие с помощью кабелей и тросиков. Конструктивные особенности этого проекта находятся под патентной охраной и не представлены конкретными чертежами [15, 16].

Пассивные экзоскелеты нашли свое основное применение в военных целях.

В России фирмой «Транспортные шагающие системы» создан пассивный экзоскелет *K-2*, предназначенный для нужд военных и МЧС [17]. Данное устройство помогает человеку переносить тяжести (типа рюкзака, бронежилет, защита сапера, снаряжение пожарного) массой до 50 кг длительное время без больших усилий и нагрузки на собственный опорно-двигательный аппарат. Минимальные размеры и масса устройства (от 2 кг), эргономичность, неприхотливость в обслуживании делают его незаменимым помощником в длительных экспедициях, военных марш-бросках, в районах с чрезвычайной ситуацией. Основной материал, из которого сделан экзоскелет, — углепластик, обеспечивающий изделию большую прочность и малую массу. Также экзоскелет может использоваться при ранениях опорно-двигательного аппарата, позволяя человеку перемещаться на значительное расстояние с поврежденной нижней конечностью, вплоть до перелома, путем фиксации ее дополнительно бинтами или ремнями выше и ниже повреждения на устройстве *K-2*. При использовании экзоскелета *K-2* человек получает дополнительную защиту нижних конечностей и позвоночника от механических повреждений. Разработчики этой системы отмечают также возможность ее применения у инвалидов с нарушением функций нижних конечностей.

Группой российских ученых НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова создан действующий образец экзоскелета пассивной модификации *ExoAtlet P* для солдат и спасателей МЧС, который позволяет человеку-

оператору переносить большие грузы (70–100 кг). Модификация экзоскелета — *ExoAtlet P-1* — создана для снятия нагрузки с бойцов при переноске штурмового щита. Конструкция данной версии экзоскелета снабжена устройством для фиксации и быстрого снятия щита, что крайне важно во время боевых действий. В качестве показаний для его использования предлагаются следующие ситуации [18–22]:

- разбор завалов при аварийно-спасательных работах и ликвидация последствий стихийных бедствий или техногенных катастроф, выполнение операций пожаротушения при ограниченных запасах воздуха в дыхательных аппаратах;

- строительные работы и решение задач, сопровождаемых переноской тяжелых грузов на большие расстояния;

- разминирование и проведение антитеррористических мероприятий;

- помощь людям с ограниченными физическими возможностями и транспортировка лежачих больных — пациенты получают возможность ходить, подниматься и спускаться по лестницам, садиться и вставать без посторонней помощи.

По мнению разработчиков, аппарат *ExoAtlet P* — это решение проблемы симбиоза человека и машины на уровне механо-тактильного взаимодействия. Это интеграция человека и робота [18].

В зарубежной литературе нам встретились следующие описания пассивных экзоскелетов.

Мягкий пневматический экзоскелет, созданный группой исследователей из университета Карнеги Меллон, Гарвардского университета, университета Южной Калифорнии, Массачусетского технологического института и разработчиком носимых датчиков BioScience. Он включает в себя гибкие искусственные мышцы, легкие сенсорные датчики и управляющее программное обеспечение. Изготовлен аппарат из мягкого эластичного полимера.

В настоящее время его можно носить лишь на голени, биологическая структура которой кропотливо воспроизведена в устройстве. В новом устройстве три цилиндрические искусственные мышцы соответствуют мышцам передней части голени и одна — задней. Искусственные сухожилия (стальные кабели) протянуты от концов этих мышц вниз к стопе и служат для перемещения лодыжки.

Обратная связь обеспечивается с помощью гиперупругих тензометрических датчиков, расположенных на верхней и боковой части лодыжки. Каждый датчик состоит из резинового пласта, содержащего микроканалы, заполненные жидким проводником из металлического сплава. Форма этих каналов изменяется, когда эластичный материал растягивается или сжимается, тем самым изменяя электрическое сопротивление металла. Когда изменение сопротивления зарегистрируется, программное обеспечение может установить положение голеностопного сустава.

Подвижность обеспечивается благодаря гибким материалам, но гибкость создает и определенную проблему: такое устройство гораздо тяжелее контролировать,

чем экзоскелет из привычных жестких материалов, поэтому и датчики здесь должны быть чувствительнее, и способы контроля — более точные. Лабораторные тесты показали, что устройство в состоянии передвигать лодыжками испытуемых в достаточном для нормальной ходьбы 27-градусном диапазоне движения. Но это только опытный образец, в настоящее время ученые пытаются усовершенствовать конструкцию так, чтобы пациентам с реальными проблемами подвижности было удобнее носить аппарат [23–25].

При использовании экзоскелетов подобного типа уменьшаются метаболические затраты, возникающие при ходьбе [26, 27], в связи с чем эти аппараты успешно используются при обучении ходьбе и возвращении утраченных функций у постинсультных больных и больных с реабилитацией после спинномозговой травмы [28–32].

Экспериментальная модель экзоскелета верхней конечности *Exoskeleton Prototype 3 (EXO-UL3)*, Университет Калифорнии, США) благодаря приводам, управляемым нейронными сигналами самого владельца, позволяет перемещать конечность во всех плоскостях. Принцип работы такой системы заключается в следующем. Желание человека сместить куда-либо руку (плечо, кисть) машина обнаруживает благодаря неинвазивной поверхностной электромиографии — набору датчиков, снимающих биотоки, командующие мышцами. Естественную неуловимую глазом задержку между появлением первых миоэлектрических сигналов и фактическим началом движения той или иной мышцы компьютер использует, чтобы успеть вычислить предполагаемое смещение руки, применяя свою цифровую модель человеческой конечности (дополнительно задействуется обратная связь от датчиков фактической позиции и скорости частей машины). В результате приводы костюма-робота срабатывают абсолютно синхронно с сокращениями мышц и «давят» в ту сторону, в какую носитель аппарата желает согнуть свою руку. Однако система управления (биопорт) несовершенна [23–25]. Чувствительный к миоэлектрическим сигналам костюм способен повышать силу мышц конечностей у людей, страдающих нейродегенеративными заболеваниями, но, по мнению авторов, данная система нуждается в дальнейшей доработке [33]. Конструкции, аналогичные приведенной выше, были использованы и в работах других авторов. При этом они старались устранить целый ряд выявленных недостатков прототипа [34–36].

В настоящее время ведутся активные разработки, касающиеся различных аспектов восполнения фундаментальных знаний по экзоскелетам. В основном их можно сгруппировать по следующим направлениям:

- исследование кинематических и биомеханических свойств новых аппаратов и создание на этой основе оптимальных принципов и схем их использования [17, 37–45];

- создание методов определения системных параметров экзоскелета и контроля его работы, позволяющих разработчику оперативно и системно оценивать различные варианты конструкции исполнительного механизма в соответствии с выбранными критериями [46–48];

применение компьютерного анализа виртуальных топографо-анатомических сред при проектировании биомеханических систем [49–57];

создание и совершенствование принципиальных узлов и материалов экзоскелета, обеспечивающих его эффективную работу [58–66].

Наиболее востребованной, судя по описаниям авторов, ссылкой на ряд трудов этой группы ученых и длительности публикаций на эту тему, является разработка исследователей под руководством Тарика Рахмана из Университета штата Делавэр [33]. Данная конструкция получила название *WREX — Wilmington Robotic Exoskeleton*. Она ориентирована на детей со слабостью верхних конечностей и представляет собой подвижную систему поддерживающих соединений, которая устанавливается на активные суставы и мышцы ребенка с помощью специальной куртки-жилета и закрепляется обычно на инвалидной коляске. Движения конечности осуществляются с небольшим усилием. Конструкция позволяет выполнять движения с ограниченной амплитудой в трех измерениях.

Однако данная модель доступна только в США, а конструкция экзоскелета нуждается в постоянной адаптации его к анатомическим параметрам ребенка. Подробная конструктивная информация по данной разработке в опубликованных материалах не представлена, что делает ее реализацию без проведения дополнительных исследований практически невозможной [67, 68].

В России в настоящее время встречаются описания лишь единичных исследований по разработке экзоскелета для верхней конечности человека. Часть работ находится в стадии проектирования. Описана математическая модель экзоскелета руки человека, для которой решены прямая и обратная задачи кинематики, а также определена погрешность позиционирования устройства в пространстве, зависящая от линейной и угловой погрешностей [69–71].

Авторами данного сообщения сформулированы клинично-анатомические критерии, предъявляемые к экзоскелету для людей с потерянными функциями верхней конечности. В доступной литературе мы не нашли такие требования. При разработке критериев мы исходили из строения и функций здоровой конечности. Для этого был проанализирован материал по активной и пассивной амплитуде движений верхней конечности у здорового человека в случае потери их при различных состояниях. Установлено, что для пациентов, имеющих выраженные ограничения активной подвижности в верхних конечностях, необходимо создавать экзоскелет, который обладает объемом движений, приближенным к показателям здорового человека:

- 1) фрагменты конструкции должны повторять строение верхней конечности человека;
- 2) конструкция должна быть легкой и в то же время прочной;
- 3) экзоскелет должен изготавливаться из безопасных материалов;
- 4) должна существовать возможность замены элементов конструкции по мере роста ребенка;

5) цена должна быть доступна для массового потребителя;

6) модель не должна зависеть от источников питания;

7) экзоскелет должен обладать определенным объемом движений для крупных суставов, чтобы осуществлять привычные для жизнедеятельности двигательные акты.

При выполнении данных условий возможно создание конструкции экзоскелета, позволяющей осуществить как абилитацию и реабилитацию людей-инвалидов, так и их социальную адаптацию [72–74].

В настоящее время экзоскелет используется в основном для реабилитации и в меньшей степени — для абилитации [75], однако социальная значимость последнего направления заставляет уделять внимание при конструировании экзоскелета расширению его возможностей для адаптации инвалидов к повседневной жизни посредством восполнения функций, без которых человек не может самостоятельно существовать [72–74].

Использованию экзоскелетов верхней конечности посвящен целый ряд исследований, позволяющих представить область их возможного применения. В максимальном количестве работ подобного плана рассматривается лечение постинсультных параличей верхней конечности [76–86]. Гораздо меньшее число исследований посвящено реабилитации последствий спинномозговой травмы [87] и реабилитации при рассеянном склерозе [88], а в педиатрической практике — реабилитации верхней конечности при параличах, связанных с нарушением целостности плечевого сплетения при родах [89], и для восполнения хватательной функции кисти при параличе большого пальца кисти [90]. Однако вследствие новизны данного направления четких показаний к применению экзоскелетов верхней конечности не выработано.

Для наших разработок интерес представляли те случаи, где «ядром» клинической картины служит синдром двух/одностороннего верхнего вялого/смешанного паралича (пареза). Был создан перечень данных заболеваний [91–97]:

артрогриппоз — системное заболевание скелетно-мышечной системы, характеризующееся контрактурами и деформацией конечностей, недоразвитием суставов и мышц, а также фиброзом;

смешанные формы детского церебрального паралича;

невральная амиотрофия;

спинальная амиотрофия — группа генетических заболеваний, характеризующаяся поражением двигательных нейронов на уровне передних рогов спинного мозга;

плечевая плексопатия на фоне тромбоцитопенической пурпуры Шенлейна–Геноха, родовой травмы («акушерский паралич» при переломе ключицы), дополнительных шейных ребер (синдром «верхней апертуры грудной клетки»), опухоли Панкоста (опухоль верхушки легкого), неправильного положения верхней конечности во время наркоза при длительном течении операционного периода, гранулематозной васкулопатии,

ассоциированной с вирусом Herpes zoster, экзогенной интоксикации дофамином;

синдром Гийена–Барре–Штрöля — острая аутоиммунная воспалительная демиелинизирующая полирадикулонейропатия;

синдром Ларсена — наследственное заболевание, отличающееся множественными врожденными вывихами, характерным видом лица и скелетными аномалиями;

синдром Элерса–Данлоса (коллагенозы);

дистрофическая дисплазия;

различные формы врожденной миопатии — синдром «центрального стержня», немалиновая миопатия и другие варианты синдрома «вялого ребенка»;

миотоническая дистрофия;

атонически-астатическая форма детского церебрального паралича, смешанные формы детского церебрального паралича с преобладанием гипотонуса мышц конечностей.

Синдром верхнего вялого паралича встречается при многих заболеваниях и может служить причиной инвалидизации. Поскольку верхние конечности играют преобладающую роль в освоении окружающего мира, у пациентов с верхним вялым параличом утрачиваются функции социальной адаптации, невозможными становятся навыки самообслуживания, что вынуждает инвалидов всецело зависеть от посторонней помощи [98].

При всем многообразии этиологии верхнего вялого/смешанного паралича клиническая картина у таких пациентов в целом однотипна. Основными признаками симптомокомплекса, требующими применения экзоскелета, являются снижение силы мышц верхних конечностей; ограничение скорости, объема (амплитуды) движений в проксимальных и дистальных отделах верхних конечностей с преобладающим ухудшением в проксимальных отделах; сниженный мышечный тонус в проксимальных и дистальных отделах верхних конечностей либо наличие смешанного тонуса с преобладанием гипофункции; снижение или отсутствие сухожильных рефлексов с рук (сгибательно-локтевой, разгибательно-локтевой, карпорадиальный).

По данным Госкомстата, численность лиц, впервые признанных инвалидами, в 2013 г. в России составила 1 141 969 человек или 77,6 на 10 000 населения. Заболевания, приводящие к инвалидизации населения, отмечаются в любом возрасте, но особенно остро они ощущаются среди детей и подростков [99–104].

В данной ситуации растет актуальность разработки для пациентов с синдромом верхнего вялого пареза такого вида реабилитационного лечения, при котором будет осуществляться воздействие, дополняющее медикаментозную терапию, на обратную биологическую связь между центральным и периферическим отделом нервной системы, а значит, косвенно и на прямую связь.

Решение этой задачи во многом становится возможным благодаря инновационному направлению биоинженерии — конструированию и внедрению экзоскелетов верхней конечности [105–108].

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

1. Модели с активным принципом работы позволяют выполнять большой объем движений, однако зависимость от источников внешнего питания, дороговизна, массивность конструкции ограничивают их широкое применение, в том числе и в медицинских целях. Этим недостатком лишены пассивные экзоскелеты. Они не зависят от источников внешнего питания, следовательно, масса конструкции меньше, надежность гораздо выше. Стоимость пассивных устройств и их обслуживания гораздо ниже, чем их активных аналогов.

2. Большинство известных конструкций ориентированы на военную промышленность, материалы разработок скудно представлены в публичном доступе, часто попросту засекречены. При этом такие модели предназначены для здоровых людей (военнослужащих).

3. Актуальной задачей настоящего времени является разработка экзоскелетов с расширением их возможностей для адаптации инвалидов в повседневной жизни посредством восполнения утраченных функций.

Финансирование исследования. Работа выполнена за счет бюджетных средств Волгоградского государственного медицинского университета и Волгоградского медицинского научного центра.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Литература

1. Экзоскелет. Википедия. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=67717712> (дата обращения: 12.02.2015).
2. Экзоскелет — военное и мирное применение. Главный механик 2011; 11: 50–54.
3. Бедняк С.Г., Еремина О.С. Роботизированные экзоскелеты HAL (почувствуй себя HAL'ком). В кн.: Сборник научных трудов Sworld. Вып. 2. Т. 1. Одесса; 2014; с. 49–51.
4. HULC. Lockheed Martin. URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/hulc.html>.
5. Binkiewicz-Glinska A., Sobierajska-Rek A., Bakula S., Wierzba J., Drewek K., Kowalski I.M., Zaborowska-Sapeta K. Arthrogyposis in infancy, multidisciplinary approach: case report. BMC Pediatr 2013; 13: 184, <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2431-13-184>.
6. Технологии: железные солдаты. «Братишка» журнал для спецназа 2011; 1: 37–41.
7. Raytheon XOS 2 exoskeleton, second-generation robotics suit, United States of America. URL: <http://www.army-technology.com/projects/raytheon-xos-2-exoskeleton-us> (дата обращения: 27.12.2014).
8. A human exoskeleton. Washington Post 2008 May 6. URL: <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/05/02/AR2008050203382.html>.
9. Paraplegic support suits. TrendHunter. Published: 4 Apr, 2008. URL: <http://www.trendhunter.com/trends/helping-paraplegics-walk-rewalk-exoskeleton>.
10. Rewalk' bionic legs get FDA approval. News.com.au. Published: 17 Jan, 2011. URL: <http://www.news.com.au/technology/rewalk-bionic-legs-get-fda-approval/story-e6ffro0-1225989332272>.
11. Rosen M. Mind to motion: brain-computer interfaces

promise new freedom for the paralyzed and immobile. *Science News* 2013; 184(10): 22–24, <http://dx.doi.org/10.1002/scin.5591841017>.

12. Moreno J., Turowska E., Pons J.L. Wearable lower limb and full-body robots. In: *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*. Edited by Pons J.L. Wiley; 2008; p. 283–321.

13. eLEGS™. Berkeley robotics and human engineering laboratory. URL: <http://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2>.

14. Kazerooni H. Human augmentation and exoskeleton systems in Berkeley. *Int J Human Robot* 2007; 4(3): 575–605, <http://dx.doi.org/10.1142/S0219843607001187>.

15. Avril T. Instant strength from the Titan Arm. *The Philadelphia Inquirer* 2013 Jun 2. URL: <http://titanarm.com>.

16. Zolfagharifard E. The wearable robot that turns anyone into a SUPERHERO: bionic arm lets users lift an extra 40lb effortlessly. *Mail Online*. Published: 10 Dec, 2013. URL: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2521245/Titan-Arm-bionic-exoskeleton-lets-users-lift-extra-40lb-effortlessly.html>.

17. Пассивный экзоскелет «К-2». Транспортные шагающие системы. URL: <http://twssystem.ru/node/6>.

18. Медицинский экзоскелет для реабилитации. *ExoAtlet*. URL: <http://www.exoatlet.ru>.

19. Российские ученые представили первый действующий образец экзоскелета для штурмовых отрядов и спасателей МЧС. *Nano News Net*. Published: 22 Aug, 2013. URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2013/rossiiskie-uchenye-predstavili-pervyi-deistvuyushchii-obrazets-ekzoskeleta-dlya-shturmovykh>.

20. Vukobratovic M.K. When were active exoskeletons actually born? *Int J Human Robot* 2007; 4(3): 459–486, <http://dx.doi.org/10.1142/S0219843607001163>.

21. На внешней подвеске. *Наука и жизнь* 2013; 10: 39.

22. Аведиков Г.Е., Жмакин С.И., Ибрагимов В.С., Иванов А.В., Кобрин А.И., Комаров П.А. и др. Экзоскелет: конструкция, управление. В кн.: XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М; 2014; с. 84–90.

23. Park Y.-L., Chen B., Pérez-Arancibia N.O., Young D., Stirling L., Wood R.J., et al. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle, foot rehabilitation. *Bioinspir Biomim* 2014; 9(1): 016007, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3182/9/1/016007>.

24. Farris D.J., Hicks J.L., Delp S.L., Sawicki G.S. Musculoskeletal modelling deconstructs the paradoxical effects of elastic ankle exoskeletons on plantar-flexor mechanics and energetics during hopping. *J Exp Biol* 2014; 217(22): 4018–4028, <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.107656>.

25. To C.S., Kobetic R., Bulea T.C., Audu M.L., Schnellenberger J.R., Pinault G., et al. Sensor-based hip control with hybrid neuroprosthesis for walking in paraplegia. *J Rehabil Res Dev* 2014; 51(2): 229–244, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2012.10.0190>.

26. Mooney L.M., Rouse E.J., Herr H.M. Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11(1): 151, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-151>.

27. Nilsson A., Vreede K.S., Häglund V., Kawamoto H., Sankai Y., Borg J. Gait training early after stroke with a new exoskeleton — the hybrid assistive limb: a study of safety and feasibility. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11(1): 92, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-92>.

28. Murray S.A., Ha K.H., Hartigan C., Goldfarb M.

Assistive control approach for a lower-limb exoskeleton to facilitate recovery of walking following stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2014; 99: 1, <http://dx.doi.org/10.1109/tnsre.2014.2346193>.

29. Del-Ama A.J., Gil-Agudo A., Pons J.L., Moreno J.C. Hybrid FES-robot cooperative control of ambulatory gait rehabilitation exoskeleton. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11: 27, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-27>.

30. 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. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2014; 10: 1–6, <http://dx.doi.org/10.3109/17483107.2014.981875>.

31. Fleerkotte B.M., Koopman B., Buurke J.H., van Asseldonk E.H., van der Kooij H., Rietman J.S. The effect of impedance-controlled robotic gait training on walking ability and quality in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: an explorative study. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11: 26, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-26>.

32. van Dijk W., van der Kooij H., van der Kooij H. Optimization of human walking for exoskeletal support. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650394>.

33. Rosen J., Perry J.C. Upper limb powered exoskeleton. *Int J Human Robot* 2007; 4(3): 529–548, <http://dx.doi.org/10.1142/s021984360700114x>.

34. Wang S., Wang L., Meijneke C., van Asseldonk E., Hoellinger T., Cheron G., Ivanenko Y., La Scaleia V., Sylos-Labini F., Molinari M., Tamburella F., Pisotta I., Thorsteinsson F., Ilzkovitz M., Gancet J., Nevatia Y., Hauffe R., Zanow F., van der Kooij. Design and control of the MINDWALKER exoskeleton. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2015; 232(2): 277–286, <http://dx.doi.org/10.1109/tnsre.2014.2365697>.

35. Knaepen K., Beyl P., Duerinck S., Hagman F., Lefeber D., Meeusen R. Human-robot interaction: kinematics and muscle activity inside a powered compliant knee exoskeleton. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2014; 22(6): 1128–1137, <http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2324153>.

36. Shamaei K., Cenciarini M., Adams A.A., Gregorczyk K.N., Schiffman J.M., Dollar A.M. Design and evaluation of a quasi-passive knee exoskeleton for investigation of motor adaptation in lower extremity joints. *IEEE Trans Biomed Eng* 2014; 61(6): 1809–1821, <http://dx.doi.org/10.1109/TBME.2014.2307698>.

37. Cempini M., Marzegan A., Rabuffetti M., Cortese M., Vitiello N., Ferrarin M. Analysis of relative displacement between the HX wearable robotic exoskeleton and the user's hand. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11: 147, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-147>.

38. Nasikowski K., Awrejcewicz J., Lewandowski D. Kinematic analysis of the finger exoskeleton using MATLAB/Simulink. *Acta Bioeng Biomech* 2014; 16(3): 129–134.

39. 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, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650469>.

40. Ryder M.C., Sup F. Leveraging gait dynamics to improve efficiency and performance of powered hip exoskeletons. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650440>.

41. Elliott G., Sawicki G.S., Marecki A., Herr H. The

- biomechanics and energetics of human running using an elastic knee exoskeleton. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650418>.
- 42.** Esmaili M., Jarrasse N., Dailey W., Burdet E., Campolo D. Hyperstaticity for ergonomic design of a wrist exoskeleton. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650417>.
- 43.** Cempini M., De Rossi S.M., Lenzi T., Cortese M., Giovacchini F., Vitiello N., Carrozza M.C. Kinematics and design of a portable and wearable exoskeleton for hand rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650414>.
- 44.** Ates S., Lobo-Prat J., Lammertse P., van der Kooij H., Stienen A.H. SCRIPT passive orthosis: design and technical evaluation of the wrist and hand orthosis for rehabilitation training at home. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650401>.
- 45.** Wu T.M., Chen D.Z. Biomechanical study of upper-limb exoskeleton for resistance training with three-dimensional motion analysis system. *J Rehabil Res Dev 2014*; 51(1): 111–126, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2012.12.0227>.
- 46.** Hassan M., Kadone H., Suzuki K., Sankai Y. Wearable gait measurement system with an instrumented cane for exoskeleton control. *Sensors 2014*; 14(1): 1705–1722, <http://dx.doi.org/10.3390/s140101705>.
- 47.** Pehlivan A.U., Rose C., O'Malley M.K. System characterization of RiceWrist-S: a forearm-wrist exoskeleton for upper extremity rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650462>.
- 48.** Klauer C., Schauer T., Reichenfeller W., Karner J., Zwicker S., Gandolla M., Ambrosini E., Ferrante S., Hack M., Jedlitschka A., Duschau-Wicke A., Gföhler M., Pedrocchi A. Feedback control of arm movements using neuro-muscular electrical stimulation (NMES) combined with a lockable, passive exoskeleton for gravity compensation. *Front Neurosci 2014*; 8, <http://dx.doi.org/10.3389/fnins.2014.00262>.
- 49.** Вережкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Синтез кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета. В кн.: III Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки». М; 2014; с. 68–76.
- 50.** Воробьев А.А., Камаев В.А., Петрухин А.В., Егин Е.И., Поройский С.В., Баринов А.С., Егин М.Е., Крайнев А.В., Андрущенко Ф.А. Возможности применения компьютерного анализа виртуальных топографо-анатомических сред в медицине. *Известия Волгоградского государственного технического университета 2006*; 4: 34–35.
- 51.** Воробьев А.А., Камаев В.А., Петрухин А.В., Егин Е.И., Поройский С.В., Баринов А.С., Егин М.Е., Крайнев А.В., Андрущенко Ф.А. Интеллектуализация процедур диагностики с использованием рентгеновской компьютерной и магнитно-резонансной томографии на основе синтеза и анализа виртуальных топографо-анатомических сред. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета 2005*; 3: 3–6.
- 52.** Петрухин А.В., Золотарев А.В. Методика автоматизации начальных этапов процесса проектирования биомеханических систем. *Информационные технологии 2010*; 5: 73–76.
- 53.** Borovin G.K., Kostyuk A.V., Seet G. Computer simulation of the hydraulic control system for exoskeleton. Preprint, *Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science*; 2004.
- 54.** Борисов А.В. Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов. *Мехатроника, автоматизация, управление 2014*; 10: 29–33.
- 55.** Боровин Г.К., Костюк А.В., Сит Д. Математическое моделирование гидравлической системы управления экзоскелета. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*; 2004.
- 56.** Cortés C., Ardanza A., Molina-Rueda F., Cuesta-Gómez A., Unzueta L., Epelde G., Ruiz O.E., De Mauro A., Florez J. Upper limb posture estimation in robotic and virtual reality-based rehabilitation. *Biomed Res Int 2014*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/821908>.
- 57.** Agarwal P., Kuo P.H., Neptune R.R., Deshpande A.D. A novel framework for virtual prototyping of rehabilitation exoskeletons. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650382>.
- 58.** Wang S., Meijneke C., van der Kooij H. Modeling, design, and optimization of Mindwalker series elastic joint. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650381>.
- 59.** Smith R.L., Lobo-Prat J., van der Kooij H., Stienen A.H.A. Design of a perfect balance system for active upper-extremity exoskeletons. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650376>.
- 60.** Meuleman J., van Asseldonk E.H.F., van der Kooij H. Novel actuation design of a gait trainer with shadow leg approach. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650369>.
- 61.** Chen Y., Li G., Zhu Y., Zhao J., Cai H. Design of a 6-DOF upper limb rehabilitation exoskeleton with parallel actuated joints. *Biomed Mater Eng 2014*; 24(6): 2527–2535, <http://dx.doi.org/10.3233/BME-141067>.
- 62.** Sylos-Labini F., La Scaleia V., d'Avella A., Pisotta I., Tamburella F., Scivoletto G., Molinari M., Wang S., Wang L., van Asseldonk E., van der Kooij H., Hoellinger T., Cheron G., Thorsteinsson F., Ilzkovitz M., Gancet J., Hauffe R., Zanov F., Lacquaniti F., Ivanenko Y.P. EMG patterns during assisted walking in the exoskeleton. *Front Hum Neurosci 2014*; 8: 423, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00423>.
- 63.** Borisoff J.F., Mattie J., Rafer V. Concept proposal for a detachable exoskeleton-wheelchair to improve mobility and health. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650396>.
- 64.** Yu H., Huang S., Thakor N.V., Chen G., Toh S.L., Sta Cruz M., Ghorbel Y., Zhu C. A novel compact compliant actuator design for rehabilitation robots. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650478>.
- 65.** Masia L., Cappello L., Morasso P., Lachenal X., Pirrera A., Weaver P., Mattioni F. CARAPACE: a novel composite advanced robotic actuator powering assistive compliant exoskeleton: preliminary design. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*; 6650511, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650511>.
- 66.** Galinski D., Sapin J., Dehez B. Optimal design of an alignment-free two-DOF rehabilitation robot for the shoulder complex. *IEEE Int Conf Rehabil Robot 2013*, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650502>.
- 67.** Rahman T., Sample W., Jayakumar S., King M.M., Wee J.Y., Seliktar R., Alexander M., Scavina M., Clark A. Passive exoskeletons for assisting limb movement. *J Rehabil Res Dev 2006*; 43(5): 583–590, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2005.04.0070>.

68. Rahman T., Sample W., Seliktar R., Alexander M., Scavina M. A body-powered functional upper limb orthosis. *J Rehabil Res Dev* 2000; 37(6): 675–680, <http://dx.doi.org/10.1109/jtnsre.2007.897026>.
69. Градецкий В.Г. Моделирование движений человека для промышленных применений. М; 2008.
70. Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Применение разгрузочных элементов в конструкции робота-экзоскелета. *Мехатроника, автоматизация, управление* 2012; 11: 20–23.
71. Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Кинематическая модель экзоскелета руки человека и определение ошибки позиционирования. *Мехатроника, автоматизация, управление* 2014; 5: 37–41.
72. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.В. Клинико-анатомические требования к активным и пассивным экзоскелетам верхней конечности. *Волгоградский научно-медицинский журнал* 2014; 1: 56–61.
73. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.В. Основные клинико-анатомические критерии для разработки экзоскелета верхней конечности. *Журнал анатомии и гистопатологии* 2014; 1: 20–26.
74. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.В. Клинико-анатомическое обоснование требований к разработке экзоскелетов верхней конечности. *Оренбургский медицинский вестник* 2014; 3(II): 14–18.
75. Минздравсоцразвития России, Департамент трудовых отношений и государственной гражданской службы. Концепция Программы действий по улучшению условий и охраны труда, включая проведение аттестации рабочих мест по условиям труда. М; 2008.
76. Cortés C., Ardanza A., Molina-Rueda F., Cuesta-Gómez A., Unzueta L., Epelde G., Ruiz O.E., De Mauro A., Florez J. Upper limb posture estimation in robotic and virtual reality-based rehabilitation. *Biomed Res Int* 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/821908>.
77. Mao Y., Jin X., Dutta G.G., Scholz J.P., Agrawal S.K. Human movement training with a cable driven ARm EXoskeleton (CAREX). *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2015; 23(1): 84–92, <http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2329018>.
78. Mao Y., Jin X., Agrawal S.K. Real-time estimation of glenohumeral joint rotation center with cable-driven arm exoskeleton (CAREX)-A cable-based arm exoskeleton. *J Mech Robot* 2014; 6(1): 014502, <http://dx.doi.org/10.1115/1.4025926>.
79. Chang W.H., Kim Y.H. Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation. *J Stroke* 2013; 15(3): 174–181, <http://dx.doi.org/10.5853/jos.2013.15.3.174>.
80. Klamroth-Marganska V., Blanco J., Campen K., Curt A., Dietz V., Ettl T., Felder M., Fellinghauer B., Guidali M., Kollmar A., Luft A., Nef T., Schuster-Amft C., Stahel W., Riener R. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial. *Lancet Neurol* 2014; 13(2): 159–166, [http://dx.doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70305-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70305-3).
81. Grimaldi G., Manto M. Functional impacts of exoskeleton-based rehabilitation in chronic stroke: multi-joint versus single-joint robotic training. *J Neuroeng Rehabil* 2013; 10: 113, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-10-113>.
82. Simkins M., Kim H., Abrams G., Byl N., Rosen J. Robotic unilateral and bilateral upper-limb movement training for stroke survivors afflicted by chronic hemiparesis. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650506>.
83. Weiss P., Heyer L., Munte T.F., Heldmann M., Schweikard A., Maehle E. Towards a parameterizable exoskeleton for training of hand function after stroke. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013; <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650505>.
84. Martinez J.A., Ng P., Lu S., Campagna M.S., Celik O. Design of Wrist Gimbal: a forearm and wrist exoskeleton for stroke rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650459>.
85. Tang Z., Sugano S., Iwata H. A finger exoskeleton for rehabilitation and brain image study. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650446>.
86. Ockenfeld C., Tong R.K., Susanto E.A., Ho S.K., Hu X.L. Fine finger motor skill training with exoskeleton robotic hand in chronic stroke: stroke rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650392>.
87. 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.spinee.2014.03.042>.
88. Di Russo F., Berchicci M., Perri R.L., Ripani F.R., Ripani M. A passive exoskeleton can push your life up: application on multiple sclerosis patients. *PLoS One* 2013; 8(10): e77348, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0077348>.
89. López N.M., de Diego N., Hernández R., Pérez E., Ensín G., Valentinuzzi M.E. Customized device for pediatric upper limb rehabilitation in obstetric brachial palsy. *Am J Phys Med Rehabil* 2014; 93(3): 263–266, <http://dx.doi.org/10.1097/PHM.0b013e3182a51c95>.
90. Aubin P.M., Sallum H., Walsh C., Stirling L., Correia A. A pediatric robotic thumb exoskeleton for at-home rehabilitation: the Isolated Orthosis for Thumb Actuation (IOTA). *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650500>.
91. *Arthrogyposis: a text atlas*. Edited by Staheli L.T., Hall J.G., Jaffe K.M., Paholke D.O. Cambridge University Press; 1998.
92. Agras P.I., Guveloglu M., Aydin Y., Yakut A., Kabakus N. Lower brachial plexopathy in a child with Henoch-Schönlein purpura. *Pediatr Neurol* 2010; 42(5): 355–358, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2010.01.010>.
93. Binienda Z.K., Sarkar S., Mohammed-Saeed L., Gough B., Beaudoin M.A., Ali S.F., Paule M.G., Imam S.Z. Chronic exposure to rotenone, a dopaminergic toxin, results in peripheral neuropathy associated with dopaminergic damage. *Neurosci Lett* 2013; 541: 233–237, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2013.02.047>.
94. Coste B., Houge G., Murray M.F., Stitzel N., Bandell M., Giovanni M.A., Philippakis A., Hoischen A., Riemer G., Steen U., Steen V.M., Mathur J., Cox J., Lebo M., Rehm H., Weiss S.T., Wood J.N., Maas R.L., Sunyaev S.R., Patapoutian A. Gain-of-function mutations in the mechanically activated ion channel PIEZO2 cause a subtype of Distal Arthrogyposis. *Proc Natl Acad Sci USA* 2013; 110(12): 4667–4672, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1221400110>.
95. Fleming J., Fogo A., Haider S., Diaz-Cano S., Hay R., Bashir S. Varicella zoster virus brachioplexitis associated with

granulomatous vasculopathy. *Clin Exp Dermatol* 2013; 38(4): 378–381, <http://dx.doi.org/10.1111/ced.12096>.

96. Kany J., Kumar H.A., Amaravathi R.S., Abid A., Accabed F., de Gauzy J.S., Cahuzac J.P. A subscapularis-preserving arthroscopic release of capsule in the treatment of internal rotation contracture of shoulder in Erb's palsy (SPARC procedure). *J Pediatr Orthop B* 2012; 21(5): 469–473, <http://dx.doi.org/10.1097/BPB.0b013e328353a19f>.

97. van Alfen N. Clinical and pathophysiological concepts of neuralgic amyotrophy. *Nat Rev Neurol* 2011; 7(6): 315–322, <http://dx.doi.org/10.1038/nrneurol.2011.62>.

98. Мироненко В.П., Вергунова Н.С. Концепция оптимальной модели передвижения для людей с инвалидностью. Вестник Харьковской государственной академии дизайна и искусств 2014; 3: 20–23.

99. Фролов А.А. Принципы нейрореабилитации, основанные на использовании интерфейса «мозг–компьютер» и биологически адекватного управления экзоскелетом. *Физиология человека* 2013; 39(2): 99–113.

100. Лещенко Я.А., Батура О.Г., Лебедева Л.Н. Смертность населения трудоспособного возраста. Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины 2008; 3: 23–25.

101. Дьяченко В.Г., Рзянкина М.Ф., Солохина Л.В. Руководство по социальной педиатрии. Хабаровск; 2010.

102. Овчаренко С.А. Социально-гигиеническая характеристика факторов риска инвалидизации населения активного трудоспособного возраста. В кн.: Актуальные проблемы инвалидности. М; 1991; с. 48–51.

103. Баранов А.А., Щеплягина Л.А., Ильин А.Г. Состояние здоровья детей как фактор национальной безопасности. *Российский педиатрический журнал* 2005; 2: 4–8.

104. Баранов А.А. Научные и практические проблемы Российской педиатрии на современном этапе. *Педиатрия* 2005; 3: 4–7.

105. Балашова Л.М. Анализ стратегий, используемых в реабилитационном процессе семьями, воспитывающими детей с ограниченными возможностями. Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена: Аспирантские тетради 2007; 17(43-2): 23–26.

106. Astur N., Flynn J.M., Flynn J.M., Ramirez N., Glotzbecker M., van Bosse H.J., Hoashi J.S., d'Amato C.R., Kelly D.M., Warner W.C. Jr., Sawyer J.R. The efficacy of rib-based distraction with VEPTR in the treatment of early-onset scoliosis in patients with arthrogyrosis. *J Pediatr Orthop* 2014; 34(1): 8–13, <http://dx.doi.org/10.1097/BPO.0b013e3182a00667>.

107. Соловьева К.С., Битюков К.А. Проблема детской инвалидности в связи с ортопедической патологией и задачи ортопеда при проведении медицинской реабилитации. В кн.: Оптимальные технологии диагностики и лечения в детской травматологии и ортопедии, ошибки и осложнения. СПб; 2003; с. 13–16.

108. Макарова М.Р., Лядов К.В., Турова Е.А., Кочетков А.В. Возможности современной механотерапии в коррекции двигательных нарушений неврологических больных. Вестник восстановительной медицины 2014; 1: 54–62.

References

1. Ekzoskelet [Exoskeleton]. *Vikipediya*. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=67717712> (accessed: 12.02.2015).

2. Ekzoskelet — voennoe i mirnoe primenenie [Exoskeleton — military and peaceful application]. *Glavnyy mekhanik* 2011; 11: 50–54.

3. Bednyak S.G., Eremina O.S. Robotizirovannye ekzoskelety HAL (pochuvstvuy sebya HAL'kom). V kn.: *Sbornik nauchnykh trudov Sworld*. Vyp. 2. T. 1 [Robotic exoskeletons HAL (feel yourself a HAL'er)]. In: Collection of scientific works Sworld. Issue 2. Vol. 1]. Odessa; 2014; p. 49–51.

4. HULC. *Lockheed Martin*. URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/hulc.html>.

5. Binkiewicz-Glinska A., Sobierajska-Rek A., Bakula S., Wierzbza J., Drewek K., Kowalski I.M., Zaborowska-Sapeta K. Arthrogyrosis in infancy, multidisciplinary approach: case report. *BMC Pediatr* 2013; 13: 184, <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2431-13-184>.

6. Technologies: iron soldiers. *“Bratishka” zhurnal dlya spetsnaza* 2011; 1: 37–41.

7. *Raytheon XOS 2 exoskeleton, second-generation robotics suit, United States of America*. URL: <http://www.army-technology.com/projects/raytheon-xos-2-exoskeleton-us> (accessed: 27.12.2014).

8. A human exoskeleton. *Washington Post* 2008 May 6. URL: <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2008/05/02/AR2008050203382.html>.

9. Paraplegic support suits. *TrendHunter*. Published: Apr 4, 2008. URL: <http://www.trendhunter.com/trends/helping-paraplegics-walk-rewalk-exoskeleton>.

10. Rewalk' bionic legs get FDA approval. *News.com.au*. Published: 17 Jan, 2011. URL: <http://www.news.com.au/technology/rewalk-bionic-legs-get-fda-approval/story-e6frro0-1225989332272>.

11. Rosen M. Mind to motion: brain-computer interfaces promise new freedom for the paralyzed and immobile. *Science News* 2013; 184(10): 22–24, <http://dx.doi.org/10.1002/scin.5591841017>.

12. Moreno J., Turowska E., Pons J.L. Wearable lower limb and full-body robots. In: *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*. Edited by Pons J.L. Wiley; 2008; p. 283–321.

13. *eLEGS™. Berkeley robotics and human engineering laboratory*. URL: <http://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2>.

14. Kazerooni H. Human augmentation and exoskeleton systems in Berkeley. *Int J Human Robot* 2007; 4(3): 575–605, <http://dx.doi.org/10.1142/S0219843607001187>.

15. Avril T. Instant strength from the Titan Arm. *The Philadelphia Inquirer* 2013 Jun. URL: <http://titanarm.com>.

16. Zolfagharifard E. The wearable robot that turns anyone into a SUPERHERO: bionic arm lets users lift an extra 40lb effortlessly. *Mail Online Published*: 10 Dec, 2013. URL: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2521245/Titan-Arm-bionic-exoskeleton-lets-users-lift-extra-40lb-effortlessly.html>.

17. Passive exoskeleton “K-2”. *Transportnye shagayushchie sistemy*. URL: <http://twssystem.ru/ru/node/6>.

18. A medical exoskeleton for rehabilitation. *ExoAtlet*. URL: <http://www.exoatlet.ru>.

19. Russian scientists presented the first working model of an exoskeleton for assault units and emergencies rescuers. *Nano News Net*. Published: 22 Aug, 2013. URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2013/rossiiskie-uchenye-predstavili-pervyi-deistvuyushchii-obrazets-ekzoskeleta-dlya-shturmovyk>.

20. Vukobratovic M.K. When were active exoskeletons actually born? *Int J Human Robot* 2007; 3(4): 459–486, <http://dx.doi.org/10.1142/S0219843607001163>.

21. On the outer suspension. *Nauka i zhizn'* 2013; 10: 39.
22. Avedikov G.E., Zhmakin S.I., Ibragimov V.S., Ivanov A.V., Kobrin A.I., Komarov P.A., et al. Ekzoskelet: konstruktsiya, upravlenie. V kn.: *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [Exoskeleton: design and control. In: The XII All-Russian conference on the problems of control "VSPU-2014"]. Moscow; 2014; p. 84–90.
23. Park Y.-L., Chen B., Pérez-Arancibia N.O., Young D., Stirling L., Wood R.J., et al. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle, foot rehabilitation. *Bioinspir Biomim* 2014; 9(1): 016007, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3182/9/1/016007>.
24. Farris D.J., Hicks J.L., Delp S.L., Sawicki G.S. Musculoskeletal modelling deconstructs the paradoxical effects of elastic ankle exoskeletons on plantar-flexor mechanics and energetics during hopping. *J Exp Biol* 2014; 217(22): 4018–4028, <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.107656>.
25. To C.S., Kobetic R., Bulea T.C., Audu M.L., Schnellenberger J.R., Pinault G., et al. Sensor-based hip control with hybrid neuroprosthesis for walking in paraplegia. *J Rehabil Res Dev* 2014; 51(2): 229–244, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2012.10.0190>.
26. Mooney L.M., Rouse E.J., Herr H.M. Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11(1): 151, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-151>.
27. Nilsson A., Vreede K.S., Häglund V., Kawamoto H., Sankai Y., Borg J. Gait training early after stroke with a new exoskeleton — the hybrid assistive limb: a study of safety and feasibility. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11(1): 92, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-92>.
28. Murray S.A., Ha K.H., Hartigan C., Goldfarb M. Assistive control approach for a lower-limb exoskeleton to facilitate recovery of walking following stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2014; 99: 1, <http://dx.doi.org/10.1109/tnsre.2014.2346193>.
29. Del-Ama A.J., Gil-Agudo A., Pons J.L., Moreno J.C. Hybrid FES-robot cooperative control of ambulatory gait rehabilitation exoskeleton. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11: 27, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-27>.
30. 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. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2014; 10: 1–6, <http://dx.doi.org/10.3109/17483107.2014.981875>.
31. Flerkotte B.M., Koopman B., Buurke J.H., van Asseldonk E.H., van der Kooij H., Rietman J.S. The effect of impedance-controlled robotic gait training on walking ability and quality in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: an explorative study. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11: 26, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-26>.
32. van Dijk W., van der Kooij H., van der Kooij H. Optimization of human walking for exoskeletal support. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650394>.
33. Rosen J., Perry J.C. Upper limb powered exoskeleton. *Int J Human Robot* 2007; 4(3): 529–548, <http://dx.doi.org/10.1142/s021984360700114x>.
34. Wang S., Wang L., Meijneke C., van Asseldonk E., Hoellinger T., Cheron G., Ivanenko Y., La Scaleia V., Sylos-Labini F., Molinari M., Tamburella F., Pisotta I., Thorsteinsson F., Ilzkovitz M., Gancent J., Nevatia Y., Haufler R., Zanow F., van der Kooij. Design and control of the MINDWALKER exoskeleton. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2015; 23(2): 277–286, <http://dx.doi.org/10.1109/tnsre.2014.2365697>.
35. Knaepen K., Beyl P., Duerinck S., Hagman F., Lefeber D., Meeusen R. Human-robot interaction: kinematics and muscle activity inside a powered compliant knee exoskeleton. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2014; 22(6): 1128–1137, <http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2324153>.
36. Shamaei K., Cenciarini M., Adams A.A., Gregorczyk K.N., Schiffman J.M., Dollar A.M. Design and evaluation of a quasi-passive knee exoskeleton for investigation of motor adaptation in lower extremity joints. *IEEE Trans Biomed Eng* 2014; 61(6): 1809–1821, <http://dx.doi.org/10.1109/TBME.2014.2307698>.
37. Cempini M., Marzegan A., Rabuffetti M., Cortese M., Vitiello N., Ferrarin M. Analysis of relative displacement between the HX wearable robotic exoskeleton and the user's hand. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11: 147, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-11-147>.
38. Nasitowski K., Awrejcewicz J., Lewandowski D. Kinematic analysis of the finger exoskeleton using MATLAB/Simulink. *Acta Bioeng Biomech* 2014; 16(3): 129–134.
39. 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, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650469>.
40. Ryder M.C., Sup F. Leveraging gait dynamics to improve efficiency and performance of powered hip exoskeletons. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650440>.
41. Elliott G., Sawicki G.S., Marecki A., Herr H. The biomechanics and energetics of human running using an elastic knee exoskeleton. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650418>.
42. Esmaeili M., Jarrasse N., Dailey W., Burdet E., Campolo D. Hyperstaticity for ergonomic design of a wrist exoskeleton. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650417>.
43. Cempini M., De Rossi S.M., Lenzi T., Cortese M., Giovacchini F., Vitiello N., Carrozza M.C. Kinematics and design of a portable and wearable exoskeleton for hand rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650414>.
44. Ates S., Lobo-Prat J., Lammertse P., van der Kooij H., Stienen A.H. SCRIPT passive orthosis: design and technical evaluation of the wrist and hand orthosis for rehabilitation training at home. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650401>.
45. Wu T.M., Chen D.Z. Biomechanical study of upper-limb exoskeleton for resistance training with three-dimensional motion analysis system. *J Rehabil Res Dev* 2014; 51(1): 111–126, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2012.12.0227>.
46. Hassan M., Kadone H., Suzuki K., Sankai Y. Wearable gait measurement system with an instrumented cane for exoskeleton control. *Sensors* 2014; 14(1): 1705–1722, <http://dx.doi.org/10.3390/s140101705>.
47. Pehlivan A.U., Rose C., O'Malley M.K. System characterization of RiceWrist-S: a forearm-wrist exoskeleton for upper extremity rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650462>.
48. Klauer C., Schauer T., Reichenfelser W., Karner J., Zwicker S., Gandolla M., Ambrosini E., Ferrante S., Hack M., Jedlitschka A., Duschau-Wicke A., Gföhler M., Pedrocchi A.

Feedback control of arm movements using neuro-muscular electrical stimulation (NMES) combined with a lockable, passive exoskeleton for gravity compensation. *Front Neurosci* 2014; 8, <http://dx.doi.org/10.3389/fnins.2014.00262>.

49. Vereykin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov B.B., Yarots V.V. Sintez kinemacheskoy skhemy ispolnitel'nogo mekhanizma ekzoskeleta. V kn.: *III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Aktual'nye voprosy nauki"* [Synthesis of the kinematic scheme of the exoskeleton operating mechanism. In: The III International scientific-practical conference "Actual problems of science"]. Moscow; 2014; p. 68–76.

50. Vorob'ev A.A., Kamaev V.A., Petrukhin A.V., Egin E.I., Poroykiy S.V., Barinov A.S., Egin M.E., Kraynev A.V., Andryushchenko F.A. Feasibility of using computer analysis of virtual topographo-anatomic media in medicine. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 2006; 4: 34–35.

51. Vorob'ev A.A., Kamaev V.A., Petrukhin A.V., Egin E.I., Poroykiy S.V., Barinov A.S., Egin M.E., Kraynev A.V., Andryushchenko F.A. Intellectualization of diagnosis procedures using computed X-ray and magnetic resonance imaging on the basis of synthesis and analysis of virtual topographo-anatomic media. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* 2005; 3: 3–6.

52. Petrukhin A.V., Zolotarev A.V. Method for automation of the initial stages of biochemical system design. *Informatsionnye tekhnologii* 2010; 5: 73–76.

53. Borovin G.K., Kostyuk A.V., Seet G. Computer simulation of the hydraulic control system for exoskeleton. *Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science*; 2004.

54. Borisov A.V. Automation of rod exoskeleton design. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 2014; 10: 29–33.

55. Borovin G.K., Kostyuk A.V., Sit D. Mathematical simulation of the hydraulic system for exoskeleton control. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha*; 2004.

56. Cortés C., Ardanza A., Molina-Rueda F., Cuesta-Gymez A., Unzueta L., Epelde G., Ruiz O.E., De Mauro A., Florez J. Upper limb posture estimation in robotic and virtual reality-based rehabilitation. *Biomed Res Int* 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/821908>.

57. Agarwal P., Kuo P.H., Neptune R.R., Deshpande A.D. A novel framework for virtual prototyping of rehabilitation exoskeletons. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650382>.

58. Wang S., Meijneke C., van der Kooij H. Modeling, design, and optimization of Mindwalker series elastic joint. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650381>.

59. Smith R.L., Lobo-Prat J., van der Kooij H., Stienen A.H.A. Design of a perfect balance system for active upper-extremity exoskeletons. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650376>.

60. Meuleman J., van Asseldonk E.H.F., van der Kooij H. Novel actuation design of a gait trainer with shadow leg approach. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650369>.

61. Chen Y., Li G., Zhu Y., Zhao J., Cai H. Design of a 6-DOF upper limb rehabilitation exoskeleton with parallel actuated joints. *Biomed Mater Eng* 2014, 24(6): 2527–2535, <http://dx.doi.org/10.3233/BME-141067>.

62. Sylos-Labini F., La Scaleia V., d'Avella A., Pisotta I., Tamburella F., Scivoletto G., Molinari M., Wang S., Wang L., van Asseldonk E., van der Kooij H., Hoellinger T., Cheron G., Thorsteinsson F., Ilzkovitz M., Gancet J., Hauffe R., Zanov F., Lacquaniti F., Ivanenko Y.P. EMG patterns during assisted walking in the exoskeleton. *Front Hum Neurosci* 2014; 8: 423, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00423>.

63. Borisoff J.F., Mattie J., Rafer V. Concept proposal for a detachable exoskeleton-wheelchair to improve mobility and health. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650396>.

64. Yu H., Huang S., Thakor N.V., Chen G., Toh S.L., Sta Cruz M., Ghorbel Y., Zhu C. A novel compact compliant actuator design for rehabilitation robots. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650478>.

65. Masia L., Cappello L., Morasso P., Lachenal X., Pirrera A., Weaver P., Mattioni F. CARAPACE: a novel composite advanced robotic actuator powering assistive compliant exoskeleton: preliminary design. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013; 6650511, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650511>.

66. Galinski D., Sapin J., Dehez B. Optimal design of an alignment-free two-DOF rehabilitation robot for the shoulder complex. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650502>.

67. Rahman T., Sample W., Jayakumar S., King M.M., Wee J.Y., Seliktar R., Alexander M., Scavina M., Clark A. Passive exoskeletons for assisting limb movement. *J Rehabil Res Dev* 2006; 43(5): 583–590, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2005.04.0070>.

68. Rahman T., Sample W., Seliktar R., Alexander M., Scavina M. A body-powered functional upper limb orthosis. *J Rehabil Res Dev* 2000; 37(6): 675–680, <http://dx.doi.org/10.1109/tnsre.2007.897026>.

69. Gradetskiy V.G. *Modelirovanie dvizheniy cheloveka dlya promyshlennykh primeneniy* [Simulation of human movements for industrial applications]. Moscow; 2008.

70. Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. Application of unloading elements in robot-exoskeleton design. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 2012; 11: 20–23.

71. Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. Kinematic model of the human arm exoskeleton and positioning error determination. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 2014; 5: 37–41.

72. Vorob'ev A.A., Petrukhin A.V., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.V. Clinical and anatomic requirements to the active and passive upper limb exoskeletons. *Volgogradskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal* 2014; 1: 56–61.

73. Vorob'ev A.A., Petrukhin A.V., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.V. The basic clinical and anatomic criteria for upper limb exoskeleton development. *Zhurnal anatomii i gistopatologii* 2014; 1: 20–26.

74. Vorob'ev A.A., Petrukhin A.V., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.V. Clinical and anatomic justification of the requirements to the development of the upper limb exoskeletons. *Orenburgskiy meditsinskiy vestnik* 2014; 3(II): 14–18.

75. Minzdravotsrazvitiya Rossii, Departament trudovykh otnosheniy i gosudarstvennoy grazhdanskoy sluzhby. *Kontseptsiya Programmy deystviy po uluchsheniyu usloviy i okhrany truda, vlyuchaya provedenie attestatsii rabochikh mest po usloviyam truda* [Ministry of Health and Social

Development of the Russian Federation, Department of Labor Relations and State Civil Service. A concept of the Program of actions for improvement of working conditions and labor protection, including assessment of workplaces with respect to working conditions]. Moscow; 2008.

76. Cortés C., Ardanza A., Molina-Rueda F., Cuesta-Gymez A., Unzueta L., Epelde G., Ruiz O.E., De Mauro A., Florez J. Upper limb posture estimation in robotic and virtual reality-based rehabilitation. *Biomed Res Int* 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/821908>.

77. Mao Y., Jin X., Dutta G.G., Scholz J.P., Agrawal S.K. Human movement training with a cable driven ARm EXoskeleton (CAREX). *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2015; 23(1): 84–92, <http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2329018>.

78. Mao Y., Jin X., Agrawal S.K. Real-time estimation of glenohumeral joint rotation center with cable-driven arm exoskeleton (CAREX)-A cable-based arm exoskeleton. *J Mech Robot* 2014; 6(1): 014502, <http://dx.doi.org/10.1115/1.4025926>.

79. Chang W.H., Kim Y.H. Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation. *J Stroke* 2013; 15(3): 174–181, <http://dx.doi.org/10.5853/jos.2013.15.3.174>.

80. Klamroth-Marganska V., Blanco J., Campen K., Curt A., Dietz V., Ettl T., Felder M., Fellinghauer B., Guidali M., Kollmar A., Luft A., Nef T., Schuster-Amft C., Stahel W., Riener R. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial. *Lancet Neurol* 2014; 13(2): 159–166, [http://dx.doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70305-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70305-3).

81. Grimaldi G., Manto M. Functional impacts of exoskeleton-based rehabilitation in chronic stroke: multi-joint versus single-joint robotic training. *J Neuroeng Rehabil* 2013; 10: 113, <http://dx.doi.org/10.1186/1743-0003-10-113>.

82. Simkins M., Kim H., Abrams G., Byl N., Rosen J. Robotic unilateral and bilateral upper-limb movement training for stroke survivors afflicted by chronic hemiparesis. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650506>.

83. Weiss P., Heyer L., Munte T.F., Heldmann M., Schweikard A., Maehle E. Towards a parameterizable exoskeleton for training of hand function after stroke. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013; <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650505>.

84. Martinez J.A., Ng P., Lu S., Campagna M.S., Celik O. Design of Wrist Gimbal: a forearm and wrist exoskeleton for stroke rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650459>.

85. Tang Z., Sugano S., Iwata H. A finger exoskeleton for rehabilitation and brain image study. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650446>.

86. Ockenfeld C., Tong R.K., Susanto E.A., Ho S.K., Hu X.L. Fine finger motor skill training with exoskeleton robotic hand in chronic stroke: stroke rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650392>.

87. 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.spinee.2014.03.042>.

88. Di Russo F., Berchicci M., Perri R.L., Ripani F.R., Ripani M. A passive exoskeleton can push your life up: application on multiple sclerosis patients. *PLoS One*

2013; 8(10): e77348, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0077348>.

89. López N.M., de Diego N., Hernández R., Pérez E., Ensínck G., Valentinuzzi M.E. Customized device for pediatric upper limb rehabilitation in obstetric brachial palsy. *Am J Phys Med Rehabil* 2014; 93(3): 263–266, <http://dx.doi.org/10.1097/PHM.0b013e3182a51c95>.

90. Aubin P.M., Sallum H., Walsh C., Stirling L., Correia A. A pediatric robotic thumb exoskeleton for at-home rehabilitation: the Isolated Orthosis for Thumb Actuation (IOTA). *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2013, <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650500>.

91. *Arthrogyrosis: a text atlas*. Edited by Staheli L.T., Hall J.G., Jaffe K.M., Pahlke D.O. Cambridge University Press; 1998.

92. Agras P.I., Guveloglu M., Aydin Y., Yakut A., Kabakus N. Lower brachial plexopathy in a child with Henoch-Schönlein purpura. *Pediatr Neurol* 2010; 42(5): 355–358, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2010.01.010>.

93. Binienda Z.K., Sarkar S., Mohammed-Saeed L., Gough B., Beaudoin M.A., Ali S.F., Paule M.G., Imam S.Z. Chronic exposure to rotenone, a dopaminergic toxin, results in peripheral neuropathy associated with dopaminergic damage. *Neurosci Lett* 2013; 541: 233–237, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2013.02.047>.

94. Coste B., Houge G., Murray M.F., Stitzel N., Bandell M., Giovanni M.A., Philippakis A., Hoischen A., Riemer G., Steen U., Steen V.M., Mathur J., Cox J., Lebo M., Rehm H., Weiss S.T., Wood J.N., Maas R.L., Sunyaev S.R., Patapoutian A. Gain-of-function mutations in the mechanically activated ion channel PIEZO2 cause a subtype of Distal Arthrogyrosis. *Proc Natl Acad Sci USA* 2013; 110(12): 4667–4672, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1221400110>.

95. Fleming J., Fogo A., Haider S., Diaz-Cano S., Hay R., Bashir S. Varicella zoster virus brachioplexitis associated with granulomatous vasculopathy. *Clin Exp Dermatol* 2013; 38(4): 378–381, <http://dx.doi.org/10.1111/ced.12096>.

96. Kany J., Kumar H.A., Amaravathi R.S., Abid A., Accabed F., de Gauzy J.S., Cahuzac J.P. A subscapularis-preserving arthroscopic release of capsule in the treatment of internal rotation contracture of shoulder in Erb's palsy (SPARC procedure). *J Pediatr Orthop B* 2012; 21(5): 469–473, <http://dx.doi.org/10.1097/BPB.0b013e31828353a19f>.

97. van Alfen N. Clinical and pathophysiological concepts of neuralgic amyotrophy. *Nat Rev Neurol* 2011; 7(6): 315–322, <http://dx.doi.org/10.1038/nrneurol.2011.62>.

98. Mironenko V.P., Vergunova N.S. Concept of optimal movement model for disabled people. *Vestnik Khar'kovskoy gosudarstvennoy akademii dizayna i iskusstv* 2014; 3: 20–23.

99. Frolov A.A. Principles of neurorehabilitation based on the usage of “brain-computer” interface and biologically adequate exoskeleton control. *Fiziologiya cheloveka* 2013; 39(2): 99–113.

100. Leshchenko Ya.A., Batura O.G., Lebedeva L.N. Mortality rate of the working-age population *Problemy sotsial'noy gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny* 2008; 3: 23–25.

101. D'yachenko V.G., Rzyankina M.F., Solokhina L.V. *Rukovodstvo po sotsial'noy pediatrii* [Manual on the Social Pediatrics]. Khabarovsk; 2010.

102. Ovcharenko S.A. Sotsial'no-gigienicheskaya kharakteristika faktorov riska invalidizatsii naseleniya aktivnogo trudosposobnogo vozrasta. V kn.: *Aktual'nye problemy*

invalidnosti [Social and hygienic characteristics of risk-factors of active working-age population invalidization. In: Actual problems of disability]. Moscow; 2004/1991; p. 48–51.

103. Baranov A.A., Shcheplyagina L.A., Il'in A.G. Children health condition as a national security factor. *Rossiyskiy pediatricheskiy zhurnal* 2005; 2: 4–8.

104. Baranov A.A. Current scientific and practical problems of Russian Pediatrics. *Pediatriya* 2005; 3: 4–7.

105. Balashova L.M. Analysis of strategies, used in the rehabilitation process by the families, bringing-up disabled children. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena: Aspirantskie tetrady* 2007; 17(43-2): 23–26.

106. Astur N., Flynn J.M., Flynn J.M., Ramirez N., Glotzbecker M., van Bosse H.J., Hoashi J.S., d'Amato C.R., Kelly D.M., Warner W.C. Jr., Sawyer J.R. The efficacy of rib-based distraction with VEPTR in the treatment of early-

onset scoliosis in patients with arthrogyposis. *J Pediatr Orthop* 2014; 34(1): 8–13, <http://dx.doi.org/10.1097/BPO.0b013e3182a00667>.

107. Solov'eva K.S., Bitukov K.A. Problema detskoj invalidnosti v svyazi s ortopedicheskoy patologiyey i zadachi ortopeda pri provedenii meditsinskoj reabilitatsii. V kn.: *Optimal'nye tekhnologii diagnostiki i lecheniya v detskoj travmatologii i ortopedii, oshibki i oslozhneniya* [The problem of children disability related to orthopedic pathology and orthopedist's tasks in the course of medical rehabilitation. In: Optimal technologies of diagnosis and treatment in pediatric traumatology and orthopedics, errors and complications]. Saint Petersburg; 2003; p. 13–16.

108. Makarova M.R., Lyadov K.V., Turova E.A., Kochetkov A.V. Feasibilities of modern mechanotherapy in the correction of movement disorders in neurological patients. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny* 2014; 1: 54–62.