

---

---

# ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

---

---

УДК 617.3:615.477

## ЭКЗОСКЕЛЕТ — СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В СИСТЕМУ АБИЛИТАЦИИ И РЕАБИЛИТАЦИИ ИНВАЛИДОВ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

**А. А. Воробьев, О. А. Засыпкина, П. С. Кривоножкина, А. В. Петрухин, А. М. Поздняков**

*Волгоградский государственный медицинский университет,  
кафедра оперативной хирургии и топографической анатомии, кафедра медицинской реабилитации  
и спортивной медицины с курсом медицинской реабилитации, лечебной физкультуры,  
спортивной медицины, физиотерапии ФУВ,  
Волгоградский медицинский научный центр,  
Волгоградский государственный технический университет*

Из анализа 108 источников отечественной и зарубежной литературы выявлено, что приоритетными областями применения экзоскелетов являются военная промышленность и реабилитационная медицина. Большинство созданных экзоскелетов не могут найти массовое применение для реабилитации больных с ограничением функций верхних и нижних конечностей из-за большой массы конструкции, зависимости от источников внешнего питания, значительной их стоимости. Установлено, что наиболее приемлемым для реабилитации является конструкция пассивного экзоскелета, основными группами нуждающихся в экзоскелетах являются пациенты, страдающие парезами верхних и нижних конечностей.

*Ключевые слова:* пассивный экзоскелет, активный экзоскелет, парез, инвалид.

## CURRENT USE OF EXOSKELETON AND PROSPECTS OF ITS IMPLEMENTATION IN HABILITATION AND REHABILITATION OF DISABLED PEOPLE (ANALYTICAL REVIEW)

**A. A. Vorobiev, O. A. Zasypkina, P. S. Krivonozhkina, A. V. Petrukhin, A. M. Pozdnyakov**

The review of 108 home and foreign publications revealed that the priority areas of exoskeleton application is military industry and rehabilitation medicine. The bulk of created exoskeletons cannot be widely used for rehabilitation of patients with limited functions of the upper and lower limbs due to their large mass, dependency on the external power source as well as their high cost. We have concluded that a passive exoskeleton is the most applicable for rehabilitation; the major groups needing exoskeletons are the patients suffering from paresis of upper and lower extremities.

*Key words:* passive exoskeleton, active exoskeleton, paresis, disabled.

Экзоскелет (от греч. ἔξω — внешний и σκελετός — скелет) — устройство, предназначенное для увеличения силы человека за счет внешнего каркаса [30, 31].

Можно выделить активные и пассивные экзоскелеты. Модели с активным принципом работы используют в качестве источника энергии внешние устройства, тогда как механика пассивных экзоскелетов основана на использовании кинетической энергии и силы человека.

Активные экзоскелеты нашли свое применение в военных целях. В доступной нам литературе мы нашли свидетельства их широкого применения в военных целях. При этом из-за секретности разработок особенности их конструкции невозможно проанализировать. Максимальное количество таких разработок приходит-

ся на Пентагон: экзоскелет HULC (США), позволяющий 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. Но при этом масса устройства — 25 кг, большая часть веса 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 HULCа могут проводить только специалисты [5, 61].

Экзоскелет XOS (Sarcos, США) создан для нужд армии США. Экзоскелет представляет собой специали-

зированный костюм, предназначенный для военнослужащих полевых подразделений. У разработанного экзоскелета есть существенный недостаток — конструкция требует постоянной связи с источником энергии. Масса конструкции 70 кг, что также ограничивает его применение [26, 42, 88]. Как видно, описанные экзоскелеты направлены на увеличение выносливости, силы как верхних, так и нижних конечностей у здоровых людей, а именно военных.

В ряде стран, где приоритетными являются социальные проекты, разработаны активные экзоскелеты, позволяющие восполнять утраченные функции и осуществлять физическую и социальную реабилитацию пациентов. Примером могут служить экзоскелеты ReWalk, REX, HAL, eLEGS, конструктивные особенности которых направлены на помощь людям, имеющим сложности в передвижении:

– ReWalk (ARGO Medical Technologies, Израиль). Позволяет людям с параличом нижней половины тела (нижний парапарез) вставать на ноги и ходить, опираясь на палки. Работа конструкции ReWalk основана на датчиках, улавливающих наклон тела вперед и передающих сигнал к поддерживающим ноги приборам. Цена аппарата составляет 100 тысяч долларов. Питание осуществляется от аккумулятора, размещенного в специальном рюкзаке за спиной. Применение конструкции возможно только у лиц с сохраненными функциями верхних конечностей [35, 84, 89];

– REX (REX Bionics, Новая Зеландия). Обеспечивает дополнительную поддержку тела человека в пространстве при перемещении. Управление осуществляется при помощи джойстика и планшета. Вес экзоскелета — 38 кг. Огромный вес аппарата и его высокая себестоимость — 150 000 долларов США — делают его недоступным для массового применения [74];

– HAL, Hybrid Assistive Limb (Япония, Cyberdyne). Предназначен для пожилых людей и инвалидов, испытывающих затруднения в передвижении. Однако общий вес конструкции равен 23 кг, высота — 160 см. Кроме того, аккумуляторная батарея весит 10 кг, а время автономной работы (в условиях максимальной нагрузки) составляет 2,5 часа. Стоимость изделия — 4200 долларов США [78];

– eLEGS, компании Ekso Bionics. Специальный гидравлический экзоскелет, предназначенный для пациентов с частично парализованными нижними конечностями. Конструкция позволяет им передвигаться с использованием костылей или специальных ходунков. В основе его работы — интерфейс-аппаратно-программный комплекс, который использует естественное человеческое движение, чтобы безопасно перевести его в действие экзоскелета с помощью микрокомпьютера [39, 63].

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 попадают под патентную охрану и не представлены конкретными чертежами [98, 108].

Пассивные экзоскелеты нашли свое применение в военных целях.

В России ООО «Транспортные шагающие системы» создали пассивный экзоскелет «К-2», предназначенный для нужд военных и МЧС. Данное устройство поможет человеку переносить тяжести (типа рюкзак, бронезилет, защита сапера, снаряжение пожарного) массой 50 кг длительное время без больших усилий и нагрузки на собственный опорно-двигательный аппарат. Минимальные размеры и вес 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, придающий изделию большую прочность и малый вес. Также экзоскелет может использоваться при ранениях опорно-двигательного аппарата, позволяя человеку перемещаться на значительное расстояние с поврежденной нижней конечностью, вплоть до перелома, зафиксировав ее дополнительно бинтами или ремнями выше и ниже повреждения на К-2. При использовании К-2 человек получает дополнительную защиту нижних конечностей и позвоночника от механических повреждений. При этом разработчики этой системы отмечают возможность ее использования у инвалидов, с нарушением функции нижних конечностей [27].

Механики создали первый в России действующий образец экзоскелета пассивной модификации ExoAtlet P, 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. Среди показаний для его использования предлагаются:

– 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, сопряженных с переносом тяжелых грузов на большие расстояния;

– разминирование и проведение антитеррористических мероприятий [1, 22, 29, 76, 80];

– помощь людям с ограниченными физическими возможностями и транспортировка лежачих больных. С помощью «ЭкзоАтлет» пациенты получают возможность ходить, подниматься и спускаться по лестницам, садиться и вставать без посторонней помощи.

По мнению разработчиков, «ЭкзоАтлет» — это решение проблемы симбиоза человека и машины на уровне механо-тактильного взаимодействия. Это интеграция человека и робота [29].

В проанализированной литературе нам встретились следующие описания пассивных экзоскелетов.

Мягкий пневматический экзоскелет, созданный исследователями из университета Карнеги-Меллон (Carnegie Mellon University), Гарвардского университета (Harvard University), университета Южной Калифорнии (University of Southern California), Массачусетского технологического института (MIT) и разработчика 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 прототип можно носить лишь на голени, биологическая структура которой кропотливо воспроизведена в устройстве. Три его цилиндрических искусственных 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 гистерезисных тензочувствительных датчиков, расположенных на верхней и боковой части лодыжки. Каждый датчик состоит из резинового пласта, содержащего микрочастицы, 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 зарегистрировано, программное обеспечение может установить положение голеностопного сустава. Подвижность обеспечивается благодаря гибким материалам, но гибкость представляет определенную проблему: такое устройство гораздо тяжелее контролировать, чем экзоскелет из привычных жестких материалов. Поэтому и датчики здесь должны быть чувствительнее, и способы контроля более точными. 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 [56, 99, 106]. При использовании экзоскелетов подобного типа уменьшаются метаболические затраты, возникающие при ходьбе [77, 82], 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 [48, 52, 57, 79, 101].

Экспериментальная модель экзоскелета верхней конечности Exoskeleton Prototype 3 (EXO-UL3) благодаря приводам, управляемым нейронными сигналами самого владельца, позволяет перемещать конечность

во всех плоскостях. Принципы работы такой системы: «желание» человека сместить куда-либо руку (плечо, кисть) машина обнаруживает благодаря неинвазивной поверхностной электромиографии — набору датчиков, снимающих биотоки, командуемые 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. Чувствительный к миоэлектрическим сигналам способ повысить силу мышц конечностей у людей, страдающих нейродегенеративными заболеваниями. По мнению авторов, данная система не совершенна и нуждается в дальнейшей доработке [90]. Конструкции, аналогичные приведенной выше, были использованы и в работах других авторов. При этом они старались устранить целый ряд выявленных недостатков прототипа [64, 92, 103].

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 [27, 37, 47, 49, 54, 55, 81, 91, 96, 105];

- 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 [62, 65, 85];

- применение компьютерного анализа виртуальных топографо-анатомических сред при проектировании биомеханических систем [6—10, 24, 33, 45, 46];

- создание и совершенствование принципиальных узлов и материалов экзоскелета, обеспечивающих их эффективную работу [40, 44, 59, 73, 75, 94, 95, 102, 107].

Наиболее востребованной, судя по описаниям авторов, ссылкой на ряд трудов этой группы ученых и длительность публикаций, является разработка исследователей под руководством Тарика Рахмана из Университета штата Делавэр. Данная конструкция получила название WREX — Wilmington Robotic Exoskeleton (Уилмингтонский роботизированный экзоскелет). 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 инвалидной коляски или специальной куртки-жилета. Движение конечности осуществляется с небольшим

усилием. Конструкция позволяет осуществлять движение 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 его реализацию без проведения дополнительных исследований практически невозможной [86, 87].

В настоящее время в России встречаются лишь единичные исследования по разработке экзоскелета для верхней конечности человека. Часть из них находятся в стадии проектирования, так В. Г. Градецким, И. Л. Ермоловым и др. 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 [14—16].

Коллективом авторов данного сообщения были сформулированы клинико-анатомические критерии, предъявляемые к экзоскелетам. В доступной литературе мы не нашли требования, предъявляемые к экзоскелетам, у людей с потерянными функциями верхней конечности, поэтому мы попытались их сформулировать, исходя из строения и функции здоровой конечности. Для этого мы обобщили материал по активной и пассивной амплитуде движений верхней конечности у здорового человека и ее потере при различных состояниях. В результате, мы выяснили, что для пациентов, имеющих выраженные ограничения активной подвижности в верхних конечностях, необходимо создать экзоскелет, обладающий 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 быть изготовлен из безопасных материалов.
4. Должна быть возможность замены элементов конструкции экзоскелета по мере роста ребенка.
5. Доступный по цене для массового потребителя.
6. Независимый от источников питания.
7. Экзоскелет для верхней конечности должен обладать определенным объемом движений для крупных суставов, чтобы осуществлять привычные для жизнедеятельности двигательные акты.

При выполнении данных условий возможно создать конструкцию экзоскелета, позволяющего осуществить абилитацию и реабилитацию детей-инвалидов и их социальную адаптацию [11—13]. Нами также проведены работы по анатомическому соответствию пассивного экзоскелета верхней конечности оригинальной конструкции.

Резюмируя вышесказанное, отмечаем, что модели с активным принципом позволяют выполнять боль-

ший объем работы, однако их зависимость от источников внешнего питания, дороговизна, массивность конструкции ограничивают их широкое применение, в том числе и медицинских целях. Этим недостатком лишены пассивные экзоскелеты. Они не зависят от источников внешнего питания, следовательно, масса конструкции меньше, надежность пассивной системы гораздо выше, обслуживать пассивную систему может простой механик, стоимость такого устройства и его обслуживание гораздо ниже, чем у активных аналогов.

Как видно из обзора, большинство конструкций ориентированы на военную промышленность, данные разработок скудно представлены в материалах для публичного просмотра, они попросту засекречены. При этом эти модели предназначены для здоровых людей (военнослужащих).

Для людей инвалидов экзоскелет в настоящее время используется в основном для реабилитации и в меньшей степени для абилитации [18], однако социальная значимость последнего направления заставляет нас уделять внимание при конструировании экзоскелета на расширение его возможностей для адаптации инвалидов к повседневной жизни посредством выполнения функций, без которых человек не может самостоятельно существовать [11—13].

Учитывая новизну данного направления в доступной нам литературе, мы не нашли четких показаний к использованию экзоскелетов верхней конечности, хотя нам встретился целый ряд исследований, позволяющих представить область их возможного применения. Максимальное количество работ подобного плана посвящено лечению постинсультных параличей верхней конечности [43, 50, 60, 66, 70—72, 83, 93, 97, 104].

Гораздо меньшее число исследований посвящено реабилитации последствий спинномозговой травмы [32] и реабилитации при рассеянном склерозе [53], в педиатрической практике для реабилитации верхней конечности при параличах, связанных нарушением целостности плечевого сплетения при родах [68], для восполнения хватательной функции кисти при параличе большого пальца кисти [38].

Учитывая характер наших разработок, интерес представляли те случаи, где «ядром» клинической картины является синдром двух/одностороннего верхнего вялого/смешанного паралича (пареза). Нами определен перечень данных заболеваний [34, 41, 51, 58, 67, 69, 100]:

- 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 Шенляйн-Геноха, родовой травмы («акушерский паралич» при переломе ключицы), дополнительных шейных ребер (синдром «верхней апертуры грудной клетки»), опухоли Панкоста (опухоль верхушки легкого), при неправильном положении верхней конечности во время наркоза при длительном течении операционного периода, гранулематозной васкулопатии, ассоциированной с вирусом herpes zoster, экзогенной интоксикации дофамином.

- Синдром Гийена-Барре-Штроя (острая аутоиммунная воспалительная демиелинизирующая полирадикулопатия).

- Синдром Ларсена (наследственное заболевание, характеризующееся множественными врожденными вывихами, необычным лицом и скелетными аномалиями).

- Синдром Элерса-Данлоса (коллагенозы).

- Дистрофическая дисплазия.

- Различные формы врожденной миопатии (синдром «центрального стержня», немалиновая миопатия и др. варианты синдрома «вялого ребенка»).

- Миотоническая дистрофия.

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

Таким образом, 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 детей-инвалидов всецело зависть от посторонней помощи [21].

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 рук (сгибательно-локтевой, разгибательно-локтевой, карпорадиальный), что позволяет выделить единый симптомокомплекс, встречающийся при разной патологии.

В литературе нам не встретились указания на широкое практическое применение пассивных экзоскелетов верхней конечности в нашей стране, хотя последние играют большую роль в познавательной деятельности человека для освоения мира и полноценной жизнедеятельности, особенно у детей.

По данным Госкомстата России, численность лиц, впервые признанных инвалидами, в 2013 г. в Российской Федерации составила 1141969 человек или 77,6 на 10000 населения. Заболевания, приводящие к инвалидизации населения, характерны для любого возраста, но особенно остро это ощущается среди детей и подростков [3, 4, 17, 19, 23, 28].

Складывается ситуация, когда для пациентов с синдромом верхнего вялого пареза необходимо разработать такой вид реабилитационного лечения, при котором будет осуществляться воздействие на обратную биологическую связь между центральным и периферическим отделом нервной системы, а значит, косвенно, и на прямую связь, дополняя медикаментозную терапию. При этом данный вид лечения должен быть ежедневно доступен пациентам, малобюджетен в производстве, прост и удобен в использовании, что играет ключевую роль в адаптации детей-инвалидов и позволяет им стать полноправными членами общества в равной степени со здоровыми людьми, принимать активное участие во всех сторонах общественной жизни [2, 20, 25, 36].

Решение этой задачи во многом становится возможным благодаря инновационному направлению биоинженерии — конструированию и внедрению экзоскелетов верхней конечности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аведиков Г. Е., Жмакин С. И. Экзоскелет: конструкция, управление // в сборнике: XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. — 2014. — С. 84—90.
2. Анализ стратегий, используемых в реабилитационном процессе семьями, воспитывающими детей с ограниченными возможностями // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена: Аспирантские тетради: Научный журнал. — 2007. — № 17 (43). — С. 23—26.
3. Баранов А. А., Щеплягина Л. А., Ильин А. Г. Состояние здоровья детей как фактор национальной безопасности // Российский педиатрический журнал. — 2005. — № 2. — С. 4—8.
4. Баранов А. А. Научные и практические проблемы Российской педиатрии на современном этапе // Педиатрия. — 2005. — С. 4—7.
5. Бедняк С. Г., Еремина О. С. Роботизированные экзоскелеты HAL (почувствуй себя HAL'ком) // Сборник научных трудов Sworld. — 2014. — Т. 2, № 1. — С. 49—51.
6. Борисов А. В. Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — № 10. — С. 29—33.
7. Боровин Г. К., Костюк А. В. Математическое моделирование гидравлической системы управления экзоскелетона. Д. Сит3 05-7/294 М. : [б. и.], 2004 (Ин-т прикл. математики РАН).
8. Вереikin 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 // Актуальные вопросы науки. — 2014. — № XIII. — С. 68—76.

9. Воробьев А. А., Камаев В. А., Петрухин А. В., Егин Е. И., Поройский С. В., Баринов А. С., Егин М. Е., Крайнев А. В., Андрющенко Ф. А. Возможности применения компьютерного анализа виртуальных топографо-анатомических сред в медицине // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2006. — № 4. — С. 34—35.
10. Воробьев А. А., Камаев В. А., Петрухин А. В., Егин Е. И., Поройский С. В., Баринов А. С., Егин М. Е., Крайнев А. В., Андрющенко 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. — С. 3—6.
11. Воробьев А. А., Петрухин А. В., Засыпкина О. А., Кривоножжина П. В. Клинико-анатомические требования к активным и пассивным экзоскелетам верхней конечности // Волгоградский научно-медицинский журнал. — 2014. — № 1. — С. 56—61.
12. Воробьев А. А., Петрухин А. В., Засыпкина О. А., Кривоножжина П. В. Основные клинико-анатомические критерии для разработки экзоскелета верхней конечности // Журнал анатомии и гистопатологии. — 2014. — № 1. — С. 20—26.
13. Воробьев А. А., Петрухин А. В., Засыпкина О. А., Кривоножжина П. В. Клинико-анатомическое обоснование требований к разработке экзоскелетов верхней конечности // Оренбургский медицинский вестник. — 2014. — № 3, Т. II. — С. 14—18.
14. Градецкий В. Г. Моделирование движений человека для промышленных применений. — 08-7/154 М.: Ин-т пробл. механики, 2008.
15. 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. — С. 20—23.
16. 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. — С. 37—41.
17. Дьяченко В. Г., Рзянкина М. Ф., Солохина Л. В. Руководство по социальной педиатрии. — Хабаровск, 2010. — 437 с.
18. Концепция Программы действий по улучшению условий и охраны труда (разработана Департаментом трудовых отношений и государственной гражданской службы Минздрава России), 2008.
19. Лещенко Я. А., Батура О. Г., Лебедева Л. Н. Смертность населения трудоспособного возраста // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. — 2008. — № 3. — С. 23—25.
20. 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. — С. 54—62.
21. Мироненко В. П., Вергунова Н. С. Концепция оптимальной модели передвижения для людей с инвалидностью // Вестник Харьковской государственной академии дизайна и искусств. — 2014. — № 3. — С. 20—23.
22. На внешней подвеске // Наука и жизнь. — 2013. — № 10. — С. 39.
23. Овчаренко С. А. Социально-гигиеническая характеристика факторов риска инвалидизации населения активного трудоспособного возраста // Сб. научных трудов «Актуальные проблемы инвалидности». — М.: ЦИЭТИН, 2004.
24. Петрухин А. В., Золотарев А. В. Методика автоматизации начальных этапов процесса проектирования биомеханических систем // Информационные технологии. — 2010. — № 5. — С. 73—76.
25. Соловьева К. С., Битюков К. А. Проблема детской инвалидности в связи с ортопедической патологией и задачи ортопеда при проведении медицинской реабилитации // Оптимальные технологии диагностики и лечения в детской травматологии и ортопедии, ошибки и осложнения. — СПб., 2003. — С. 13—16.
26. Технологии: железные солдаты // Братишка. Журнал для спецназа. — 2011. — № 1.
27. Транспортные шагающие системы [Электронный ресурс]. URL: <http://twsystem.ru/ru/node/6> (дата обращения: 12.02.2015).
28. Фролов А. А. Принципы нейрореабилитации, основанные на использовании интерфейса «мозг-компьютер» и биологически адекватного управления экзоскелетом // Физиология человека. — 2013. — Т. 39, № 2. — С. 99—113.
29. Экзоатлет — Российский экзоскелет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exoatlet.ru> (дата обращения: 12.02.2015).
30. Экзоскелет // Википедия [2015—2015]. Дата обновления: 05.01.2015. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=67717712> (дата обращения: 12.02.2015).
31. Экзоскелет — военное и мирное применение // Главный механик. — 2011. — № 11. — С. 50—54.
32. Aach M., Cruciger O., Sczesny-Kaiser M., Hoffken 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, Dec. 1; 14 (12): 2847-53. doi: 10.1016/j.spinee.2014.03.042. Epub 2014 Apr 4.
33. 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, Jun; 2013:6650382. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650382.
34. Agras P. I., Guveloglu M., Aydin Y., Yakut A., Kabakus N. Lower brachial plexopathy in a child with Henoch-Schönlein purpura // Pediatr Neurol. 2010, May; 42 (5): 355-8.
35. «A Human Exoskeleton» // Washington Post. 6 May 2008. Retrieved 24 April 2013.
36. 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 // Hum Mol Genet. 2013, Dec. 20.
37. 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, Jun; 2013:6650401. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650401.
38. 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, Jun; 2013:6650500. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650500.

39. Berkeley robotics and human engineering laboratory [Электронный ресурс]: URL: <http://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2>

40. *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, Jun; 2013:6650396. doi:10.1109/ICORR.2013.6650396.

41. *Binienda Z. K., Sarkar S., Mohammed-Saeed L.* Chronic exposure to rotenone, a dopaminergic toxin, results in peripheral neuropathy associated with dopaminergic damage. Division of Neurotoxicology, National Center for Toxicological Research // Neurosci Lett. 2013, Apr 29; 541:233—237. doi: 10.1016/j.neulet.2013.02.047. Epub 2013 Mar.

42. *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 // Proc Natl Acad Sci U S A. 2013, Mar 19;110(12).

43. *Chang W. H., Kim Y. H.* Robot-assisted Therapy in Stroke Rehabilitation // J Stroke. 2013, Sep; 15(3):174-81. doi: 10.5853/jos.2013.15.3.174. Epub 2013 Sep.

44. *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):2527-35. doi: 10.3233/BME-141067.

45. Computersimulation of the hydraulic control system for exoskeleton / Borovin G. K., Kostyuk A. V. G. Seet3 05-7/ 280. — М. 2004. — P. 33.

46. *Cortes C., Ardanza A., Molina-Rueda F., Cuesta-Gomez 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; 2014:821908. doi: 10.1155/2014/821908. Epub 2014 Jul 8.

47. *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, Jun; 2013:6650414. doi:10.1109/ICORR.2013.6650414.

48. *Cruciger O., Schildhauer T. A., Meindl R. C., Tegenthoff M., Schwenkreis P., Citak M., Aach M.* Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study // Disabil Rehabil Assist Technol. 2014, Nov. 10:1-6.

49. *Cempini M. (1), 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, Oct. 18;11:147. doi: 10.1186/1743-0003-11-147.

50. *Cortes C., Ardanza A., Molina-Rueda F., Cuesta-Gomez 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; 2014:821908. doi: 10.1155/2014/821908.

51. *Coste B., Houge G., Murray M. F., Stitzel N., Bandell M., Giovanni M. A., Philippakis A., Hoischen A., Riemer G., Steen U.* Gain-of-function mutations in the mechanically activated ion channel PIEZO2 cause a subtype of Distal Arthrogyposis. 10.1073/pnas.1221400110. Epub 2013 Mar 4.

52. *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, Mar. 4; 11:27. doi: 10.1186/1743-0003-11-27.

53. *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, Oct. 25; 8(10):e77348. doi: 10.1371/journal.pone.0077348.

54. *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, Jun; 2013:6650418. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650418.

55. *Esmaeili M., Jarrasse N., Dailey W., Burdet E., Campolo D.* Hyperstaticity for ergonomic design of a wrist exoskeleton // IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun; 2013:6650417. doi:10.1109/ICORR.2013.6650417.

56. *Farris D. J., Hicks J. L., Delp S. L., Sawicki G. S.* Sensor-based hip control with hybrid neuroprosthesis for walking in paraplegia // J Rehabil Res. Dev. 2014; 51(2):229-244. doi: 10.1682/JRRD.2012.10.0190.

57. *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, Mar 4; 11:26. doi: 10.1186/1743-0003-11-26.

58. *Fleming J., Fogo A., Haider S.* Varicella zoster virus brachioplexitis associated with granulomatous vasculopathy // Clin Exp Dermatol. 2013, Jun; 38 (4):378-81.

59. *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, Jun; 2013:6650502. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650502.

60. *Grimaldi G., Manto M.* Functional impacts of exoskeleton-based rehabilitation in chronic stroke: multi-joint versus single-joint robotic training // J Neuroeng Rehabil. 2013, Dec 19; 10:113. doi: 10.1186/1743-0003-10-113.

61. «HULC». Lockheed Martin // Retrieved, 2011-08-02.

62. *Hassan M., Kadone H., Suzuki K., Sankai Y.* Wearable gait measurement system with an instrumented cane for exoskeleton control // Sensors (Basel). 2014, Jan 17; 14(1):1705-22. doi: 10.3390/s140101705.

63. *Kazerooni H.* Human Augmentation and Exoskeleton Systems in Berkeley // International Journal of Humanoid Research. Vol. 4, N 3, Sep 07.

64. *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. Nov.; 22(6):1128-37. doi:10.1109/TNSRE.2014.2324153.

65. *Klauer C., Schauer T., Reichenfeller W., Karner J., Zwicker S., Gandolla M., Ambrosini E., Ferrante S., Hack M., Jedlitschka A., Duschau-Wicke A., Gfoehler 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, Sep 2; 8:262. doi: 10.3389/fnins.2014.00262.

66. *Klamroth-Marganska V., Blanco J., Campen K., Curt A., Dietz V., Ettlin T., Felder M., Fellinghauer B., Guidali M.* Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial // Lancet Neurol. 2014, Feb; 13 (2):159-66. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70305-3.

67. Kany J., Kumar H. A., Amaravathi R. S., Abid A., Accabled 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, Sep.; 21 (5):469-73.
68. Lopez N. M.(1), de Diego N., Hernandez R., Perez E., Ensinck G., Valentinuzzi M. E. Customized device for pediatric upper limb rehabilitation in obstetric brachialpalsy // *Am J Phys Med Rehabil*. 2014, Mar.; 93 (3): P. 263—266.
69. Lynn T. Staheli, M. D., Judith G. Hall, M. D. Kenneth M. Jaffe, M. D., Diane O. Pahalke, B. S. Arthrogyposis a text atlas // Cambridge University Press. 2008, P. 189.
70. 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, Feb; 6 (1):0145021-145025.
71. 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*. 2014, Jun. 5.
72. Martinez J. A., Ng P., Lu S., Campagna M. S., Celik O. Design of Wrist Gimbal: a forearm and wrist exoskeleton for stroke rehabilitation. Дизайн устройства «Wrist Gimbal» // *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2013, Jun.; 2013:6650459. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650459.
73. 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, Jun; 2013:6650511. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650511.
74. Meghan Rosen Mind to motion: Brain-computer interfaces promise new freedom for the paralyzed and immobile // *Science News*. 2013, Volume 184, Issue 10, 16 Nov. — P. 22—24.
75. Meuleman J., Meuleman J., van Asseldonk E. H., van der Kooij H. Novel actuation design of a gait trainer with shadow leg approach // *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2013, Jun; 2013:6650369. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650369.
76. Miomir Vukobratovic When Were Active Exoskeletons actually Born? // *International Journal of Humanoid Robotics*. 2007, B. 3, T. 4. — C. 459—486.
77. Mooney L. M., Rouse E. J., Herr H. M. Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking // *J Neuroeng Rehabil*. 2014, Nov. 3; 11:151. doi: 10.1186/1743-0003-11-151.
78. Moreno J., Turowska E., Wearable Lower Limb and Full-Body Robots // *ArantesWearable Robots: Biomechatronic Exoskeleton*. 2008. — P. 283—321.
79. 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, Aug 12. An.
80. Nano News Net [Электронный ресурс]: сайт о нанотехнологиях. URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2013/rossiiskie-uchenye-predstavili-pervyi-deistvuyushchii-obrazets-ekzoskeleta-dlya-shturmovyk> (дата обращения: 12.02.2015).
81. Nasilowski K., Awrejcewicz J., Lewandowski D. Kinematic analysis of the finger exoskeleton using MATLAB/Simulink // *acta Bioeng Biomech*. 2014; 16 (3):129-34.
82. Nilsson A.(1), Vreede K. S., Haglund 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, Jun. 2; 11:92. doi: 10.1186/1743-0003-11-92.
83. 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, Jun.; 2013:6650392. doi:10.1109/ICORR.2013.6650392.
84. «Paraplegic Support Suits» // *Trendhunter Magazine*. 4 April 2008. Retrieved 29 January 2013.
85. 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, Jun; 2013:6650462. doi:10.1109/ICORR.2013.6650462.
86. 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, Aug-Sep; 43(5):583-90
87. Rahman T., Sample W., Seliktar R., Alexander M., Scavina M. A body-powered functional upper limb orthosis // *J Rehabil Res Dev*. 2000; 37 (6):675-80.
88. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America // *army-technology.com*. URL: <http://www.army-technology.com/projects/raytheon-xos-2-exoskeleton-us> (дата обращения: 27.12.2014).
89. Rewalk' bionic legs get FDA approval // *News.com.au*. 17 January 2011. Retrieved 13 May 2012; 22.
90. Rosen J., J. C. Perry, Upper Limb Powered Exoskeleton // *Journal of Humanoid Robotics* 2007, Vol. 4, N. 3, 1-20.
91. Ryder M. C., Sup F. Leveraging gait dynamics to improve efficiency and performance of powered hip exoskeletons // *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2013, Jun; 2013:6650440. doi:10.1109/ICORR.2013.6650440.
92. 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, Jun; 61(6):1809-21. doi: 10.1109/TBME.2014.2307698.
93. 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, Jun; 2013:6650506.
94. Smith R. L., Lobo-Prat J., van der Kooij H., Stienen A. H. Design of a perfect balance system for active upper-extremity exoskeletons // *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2013, Jun; 2013:6650376. doi:10.1109/ICORR.2013.6650376.
95. 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 EMG patterns during assisted walking in the exoskeleton // *Front Hum Neurosci*. 2014, Jun 16; 8:423. doi: 10.3389/fnhum.2014.00423.
96. 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, Jun; 2013:6650469. doi:10.1109/ICORR.2013.6650469.

97. Tang Z., Sugano S., Iwata H. A finger exoskeleton for rehabilitation and brain image study // IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013 Jun; 2013:6650446. doi: 10.1109/ICORR.2013.6650446.
98. Titanarm [Электронный ресурс]. URL: <http://titanarm.com> (дата обращения: 27.12.2014).
99. To C. S., Kobetic R., Bulea T. C., Audu M. L., Schnellenberger J. R., Pinault G., Triolo R. J. Musculoskeletal modelling deconstructs the paradoxical effects of elastic ankle exoskeletons on plantar-flexor mechanics and energetics during hopping // J Exp Biol. 2014, Nov. 15; 217(Pt 22):4018-28. doi: 10.1242/jeb.107656.
100. van Alfen Clinical and pathophysiological concepts of neuralgic amyotrophy // Nat Rev Neurol. 2011, May 10; 7(6):315-22. doi: 10.1038/nrneurol.2011.62.
101. van Dijk W., van der Kooij H., van der Kooij H. Optimization of human walking for exoskeletal support // IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun; 2013:6650394. doi:10.1109/ICORR.2013.6650394.
102. Wang S., Meijneke C., van der Kooij H. Modeling, design, and optimization of Mindwalker series elastic joint // IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013, Jun; 2013:6650381. doi:10.1109/ICORR.2013.6650381.
103. 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., Hauffe R., Zanow F., van der Kooij. Design and Control of the MINDWALKER Exoskeleton // IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2014, Oct. 30.
104. 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, Jun; 2013:6650505. doi:10.1109/ICORR.2013.6650505.
105. 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):111-26. doi: 10.1682/JRRD.2012.12.0227.
106. Yong-Lae Park / Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle, foot rehabilitation // Bioinspir. Biomim. 2014, 9 —P. 45—51.
107. 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, Jun; 2013:6650478. doi:10.1109/ICORR.2013.6650478.
108. Zolfagharifard Ellie. The wearable robot that turns anyone into a SUPERHERO: Bionic arm lets users lift an extra 40lb effortlessly // mail online-10. Dec. 2013: URL: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2521245/Titan-Arm-bionic-exoskeleton-lets-users-lift-extra-40lb-effortlessly.html> (дата обращения: 10.02.2015).

## Контактная информация

**Воробьев Александр Александрович** — д. м. н., профессор, зав. кафедрой оперативной хирургии и топографической анатомии, Волгоградский государственный медицинский университет, e-mail: [cos@volgmed.ru](mailto:cos@volgmed.ru)