УДК 617-7/62-1/-9 *DOI: 10.26211/2658-4522-2019-1-4-5-14*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Щербина К.К., Головин М.А., Золотухина М.В.

Федеральный научный центр реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта,
ул. Бестужевская, дом 50, Санкт-Петербург, 195067, Российская Федерация

Резюме

Введение. Медицинская реабилитация с использованием технических средств реабилитации активно развивается. Все чаще в практике специалистов встречается использование экзоскелетов конечностей. При этом в России не существует четкого определения, что такое экзоскелет с точки зрения медицинской реабилитации и общепринятой классификации подобных устройств. В то же время для формирования медико-технических требований к экзоскелетам и другим ассистивным устройствам необходимо учитывать не только текущие технические и технологические возможности, но иметь горизонт планирования 3–5 лет для использования перспективных средств производства при изготовлении инновационной медицинской техники, в том числе и опытных образцов. Помочь в данной работе способен анализ текущих тенденций развития исследуемого класса устройств.

Цель. Определить направление развития роботизированных и мехатронных устройств восстановления двигательной активности пациентов на основе предлагаемой классификации.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе анализа материалов научных баз ScienceDirect, elibrary.ru за период с 1997 по 2019 г. с использованием метода анализа публикационной активности по предложенным критериям. Дополнительно была собрана информация с официальных сайтов производителей.

Результаты. Получены объективные количественные данные об экзоскелетах, используемых в медицинской реабилитации или разрабатываемых для использования в рассматриваемой области. Установлено, что мобильные экзоскелеты представляют больший интерес для разработчиков (59%), чем стационарные. Экзоскелеты для нижних конечностей и таза (68%) преобладают над моделями для верхних конечностей и плечевого пояса. Доля экзоскелетов с неадаптивным управлением составляет более 56%. Ярко заметна смена парадигмы с разработки и внедрения адаптивных принципов управления на комбинированные в 2010 г., при этом с 2015 г. преобладает комбинированный принцип управления (более 66%). По вовлеченности экзоскелета в реализуемое движение выделяются пассивно-активные экзоскелеты (51,2%).

Заключение. В результате исследования показано направление развития экзоскелетов в настоящее время: пассивно-активные экзоскелеты, мобильные экзоскелеты нижних конечностей и таза, экзоскелеты с адаптивным комбинированным принципом управления.

Ключевые слова: медицинская реабилитация, экзоскелет, техническое устройство реабилитации, классификация, направление развития.

RESEARCH OF THE DIRECTION OF DEVELOPMENT OF MUSCULOSKELETAL SYSTEM EXOSKELETONS

Shcherbina K.K., Golovin M.A., Zolotukhina M.V.

Federal Scientific Center of Rehabilitation of the Disabled named after G.A. Albrecht,
Bestuzhevskaya Street 50, 195067 Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

Introduction. Medical rehabilitation with use of technical rehabilitation devices is actively developing. Increasingly, the use of exoskeletons of the limbs is encountered in the practice of specialists. At the same time, in Russia there is no clear definition of what exoskeleton is from the point of view of medical rehabilitation, and

Щербина К.К., Головин М.А., Золотухина М.В. Исследование направления развития экзоскелетов опорно-двигательного аппарата // *Физическая и реабилитационная медицина*. – 2019. – Т. 1. – № 4. – С. 5-14.
DOI: 10.26211/2658-4522-2019-1-4-5-14

Shcherbina K.K., Golovin M.A., Zolotukhina M.V. (2019) Research of the Direction of Development of Musculoskeletal System Exoskeletons. *Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 1, no. 4, pp. 5-14. (in Russian)
DOI: 10.26211/2658-4522-2019-1-4-5-14

Щербина Константин Константинович / Konstantin K. Shcherbina; e-mail: shcherbina180@mail.ru

the generally accepted classification of such devices. At the same time, in order to form medical and technical requirements for exoskeletons and other assistive devices, it is necessary to take into account not only the current technical and technological capabilities, but to have a planning horizon of 3–5 years to use promising producer goods in the manufacture of innovative medical equipment, including prototypes. The analysis of the current trends in the studied class of devices can help to resolve this problem.

Aim. Determine the direction of development of robotic and mechatronic devices for restoring the patient's motor activity on the basis of the proposed classification.

Materials and methods. The study was conducted on the basis of the analysis of materials from ScienceDirect scientific databases, elibrary.ru for the period from 1997 to 2019 using the method of publication activity analysis on the proposed criteria. Additionally, information was collected from the official websites of manufacturers.

Results. The objective quantitative data on exoskeletons used in medical rehabilitation or being developed for use in the considered area was obtained. It has been established that mobile exoskeletons are of more interest for developers (59%) than stationary ones. Exoskeletons for the lower limbs and pelvis (68%) prevail over models for the upper limbs and shoulder girdle. The share of exoskeletons with non-adaptive control is more than 56%. The paradigm shift from the development and implementation of adaptive management principles to combined ones in 2010 is clearly visible, with the combined management principle prevailing in 2015 (more than 66%). By the involvement of the exoskeleton in the movement being implemented, passive-active exoskeletons are distinguished (51.2%).

Conclusion. As a result of the research, the current direction of exoskeleton development is shown: passive-active exoskeletons, mobile exoskeletons of the lower limbs and pelvis, exoskeletons with an adaptive combined control principle.

Keywords: medical rehabilitation, exoskeleton, technical rehabilitation device, classification, direction of development.

Введение

При рассмотрении понятия экзоскелет, его характеризуют как «внешний» скелет, который… увеличивает… динамику передвижения, повторяя биомеханику движений суставов…» [1], «устройство, предназначенное для восполнения утраченных функций… и расширения амплитуды движений…» [2], «внешнее по отношению к телу человека устройство, позволяющее усилить, дополнить, заменить, ограничить или принудительно воспроизвести движения человека» [3]. Определение Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) характеризует экзоскелеты с энергоснабжением как «рецептурные устройства, содержащие внешний, приводимый в действие, моторизованный ортез, который помещается над парализованными или ослабленными конечностями человека с целью обеспечения способности передвигаться» [4]. Под способностью передвигаться понимают «облегчение стояния, ходьбы, подъема по лестнице и выполнения повседневной деятельности».

Предлагаемые отечественными авторами классификации экзоскелетов [1–3, 5] учитывают как медицинские критерии группировки по отдельным признакам, так и технические, и даже экономические. При этом предлагаемые критерии классификации являются ориентировочными и не позволяют точно и количественно оценить объект изучения.

Для исследования в качестве прототипа была выбрана классификация [1], так как она наиболее полно отражает совокупность признаков экзоскелетов для медицинской реабилитации.

Согласно [1] следует различать экзоскелеты:

– по принципу управления – программируемые, самообучающиеся;

– по конструктивным особенностям – каркасные (жесткие), гибкие, по типу роботизированных костюмов-экзоскелетов;

– по принципу мобильности – стационарные, мобильные;

– по принципу вовлечения анатомических областей человеческого тела – для нижних конечностей и таза (НК), для верхних конечностей и плечевого пояса (ВК), для верхних и нижних конечностей и туловища;

– по энергозависимости – автономные источники питания (аккумуляторные батареи и др.), стационарные источники питания (сетевые);

– по направлению использования – индивидуальные, тренажерное оборудование для различных пользователей;

– по цели использования – реабилитационные (для пациента, одно- и многоцелевые), обеспечивающие (для медперсонала, одно- и многоцелевые).

Цель

Определить направление развития роботизированных и мехатронных устройств восстановления двигательной активности пациентов на основе предлагаемой классификации.

Материалы и методы

Исследование проведено на основе анализа материалов научных баз ScienceDirect, elibrary.ru за период с 1997 по 2019 г. [6–9] с использованием метода комплексного анализа публикационной активности. Дополнительно был произведен ана-

лиз информации с официальных сайтов разработчиков, производителей и научных коллективов, которые принимали участие в разработке экзоскелетов для медицинской реабилитации [10–39].

Объект исследования: технические средства реабилитации для опорно-двигательного аппарата. Предмет исследования: характеристики и отличительные признаки.

Исходная задача по группированию существующих моделей экзоскелетов по классификации [1] показала широкие возможности освещения темы их конструктивных особенностей с точки зрения медицинской реабилитации, но безотносительно к методологической составляющей. Отсутствие возможности оценить методологические возможности рассматриваемого оборудования, в то же время, позволило сфокусировать внимание на ряде признаков, которые изначально были раскрыты не в полной мере. В процессе анализа собранной информации было произведено расширение и уточнение. В классификацию дополнительно введены следующие критерии:

– по интеграции комплексных программ реабилитации (сочетанному использованию физических факторов) [14] – есть, нет;

– по вовлеченности экзоскелета в реализуемое движение – пассивный (0%), активный (100%), пассивно-активный (100%), полуактивный (менее 100%);

– по принципу управления – адаптивные, неадаптивные, комбинированные;

– по задающим сигналам адаптации и контроля программы управления – без использования сигналов оператора, с использованием сигналов оператора (ЭМГ, нейросенсорные), комбинированные.

Рассмотрим более подробно аспект вовлеченности экзоскелета в реализуемое движение, его описание и примеры:

– пассивный (0%) – экзоскелеты для тренировок равновесия после инсульта;

– активный (100%) – в основном стационарные и мобильные экзоскелеты НК для парализованных;

– пассивно-активный (0–100%) – стационарные тренажеры НК и ВК или мобильные экзоскелеты НК для пациентов с минимальной подвижностью;

– полуактивный (менее 100%) – роботизированные ортезы на 1 конечность (на 1–2 сустава, например, AlterGBionicLeg [15]), гибкие экзоскелеты (например, BioservoRoboticSoftExtraMuscle (SEM) Glove [13]), экзоскелеты, для управления которыми необходим сигнал электрической активности мышцы, или ЭМГ-сигнал (например, CYBERDYNE HAL LowerLimb [18]), пассивные экзоскелеты (например, HocomaArmeoSpring [14]), экзоскелеты, предназначенные для помощи после инсульта, пожилым и т.д. (например, HondaWalkingAssist [12]).

Результаты и обсуждение

На основе полученной классификации был составлен перечень экзоскелетов для медицинской реабилитации [40].

На рисунке 1 ранжированы по годам сведения о первых упоминаниях серийных экзоскелетов для медицинской реабилитации и прототипов, а также устройств, информация о сертификации которых не обновлялась.

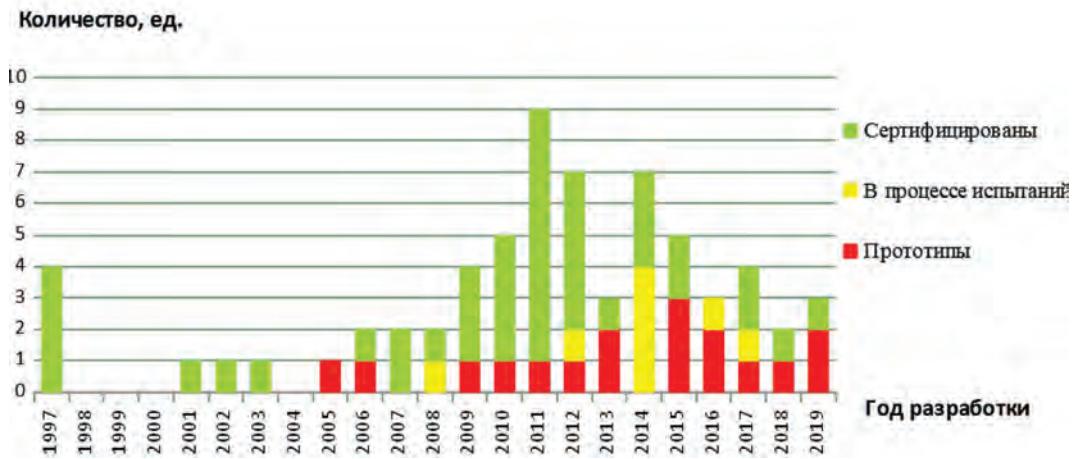


Рис. 1. График появления информации о разработке экзоскелета и прохождения им процедуры сертификации по годам разработки

Figure 1. Schedule of emergence of information on development of an exoskeleton and passing of its procedure of certification by years of development

Анализ графика на рисунке 1. Экзоскелет – дорогостоящее в разработке высокотехнологичное роботизированное устройство, которое проходит долгий путь от формирования технического задания до выпуска сертифицированного устройства. Количество представленных с 2015 по 2019 г. прототипов и серийных изделий наглядно отражает, что 35% компаний не анонсировали прототипы/образцы до тех пор, пока не получили соответствующие сертификаты, еще 11% – пока не удостоверились в готовности своих продуктов к клиническим испытаниям. По этой причине можно наблюдать появление сертифицированных изделий уже в 2018–2019 гг. Пик создания прототипов приходится на 2013–2016 гг. (41%). В период с 1997 по 2016 г. 77% из всех анонсированных экзоскелетов прошли сертификацию или находятся на стадии клинических испытаний. 23% не сдвинулись со стадии прототипов. Сведения об изделиях, представленных за период с 2017 по 2019 г., также учитываются в дальнейшей работе.

В таблице и на рисунке 2 представлена информация о сертификации экзоскелетов FDA и на соответствие директивам Европейского союза (CE) по годам разработки.

Анализ графика на рисунке 2 позволяет получить следующие сведения. Сертификацию CE прошли почти 54% компаний.

Сертификация по стандарту FDA является обязательным условием для экспорта продукции на рынок США. Из 7 компаний, представленных на графике, 2 – из Японии (Cyberdyne [18], Honda [12]), 1 – из Израиля (ReWalkRobotics [24]), 4 – из США.

Оценить направление развития экзоскелетов по принципу мобильности возможно при анализе гистограмм, представленных на рисунках 3 и 4.

Таблица / Table

Информация о сертификации экзоскелетов FDA и на соответствие директивам Европейского союза (CE)

Information on certification of exoskeletons of FDA and on compliance to directives of the European Union (CE)

№ п/п	Характеристика Characteristic	Классификация экзоскелетов по принципу вовлечения анатомических сегментов Classification of exoskeletons by the principle of involvement of anatomic segments		
		для верхних конечностей и плечевого пояса for the upper limbs and the humeral belt	для нижних конечностей и таза for the lower limbs and the basin	поясничный lumbar
1	Общее количество Total	14	26	1
2	Национальные сертификаты National certificates	14	26	1
3	Получено одобрение FDA Approved by FDA	1	6	0
4	Имеют сертификацию Европейского союза Certificated by the EU	6	15	1
4.1	из них для всех возрастов from them: for all age	3	6	0
4.2	из них только для детей from them: only for children	0	1	0
4.3	из них для взрослых и подростков from them: for adults and teenagers	5	1	0

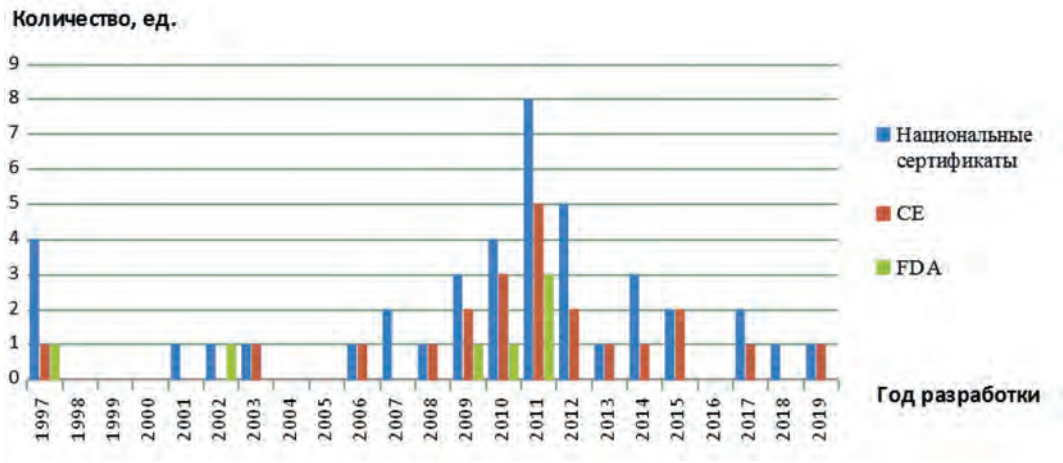
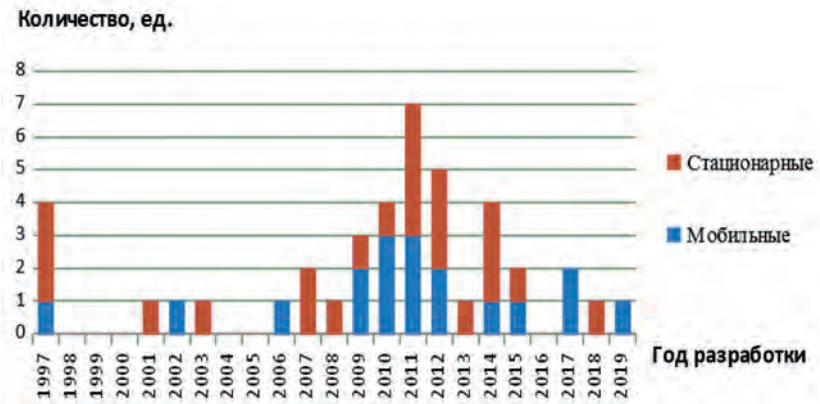
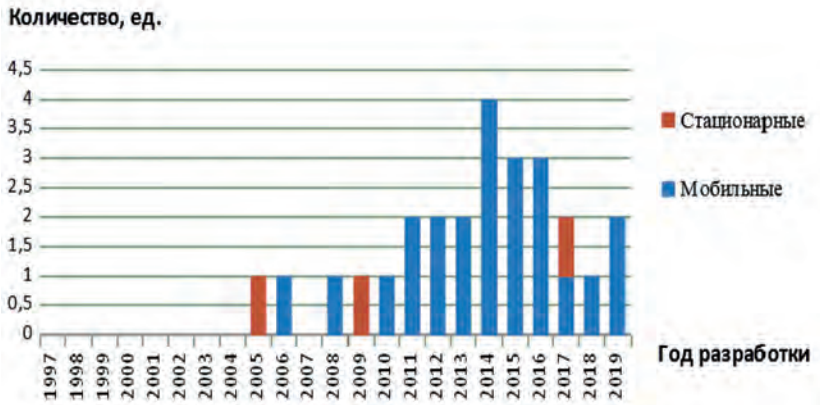


Рис. 2. График прохождения процедур FDA и CE сертификации по годам разработки
Figure 2. Schedule of passing of FDA and CE Certification by years of development



a



b

Рис. 3. Ранжирование экзоскелетов по принципу мобильности по годам разработки.
a – экзоскелеты сертифицированные; b – прототипы экзоскелетов
Figure 3. Ranging of exoskeletons by the principle of mobility by years of development.
a – certified exoskeletons; b – prototypes of exoskeletons

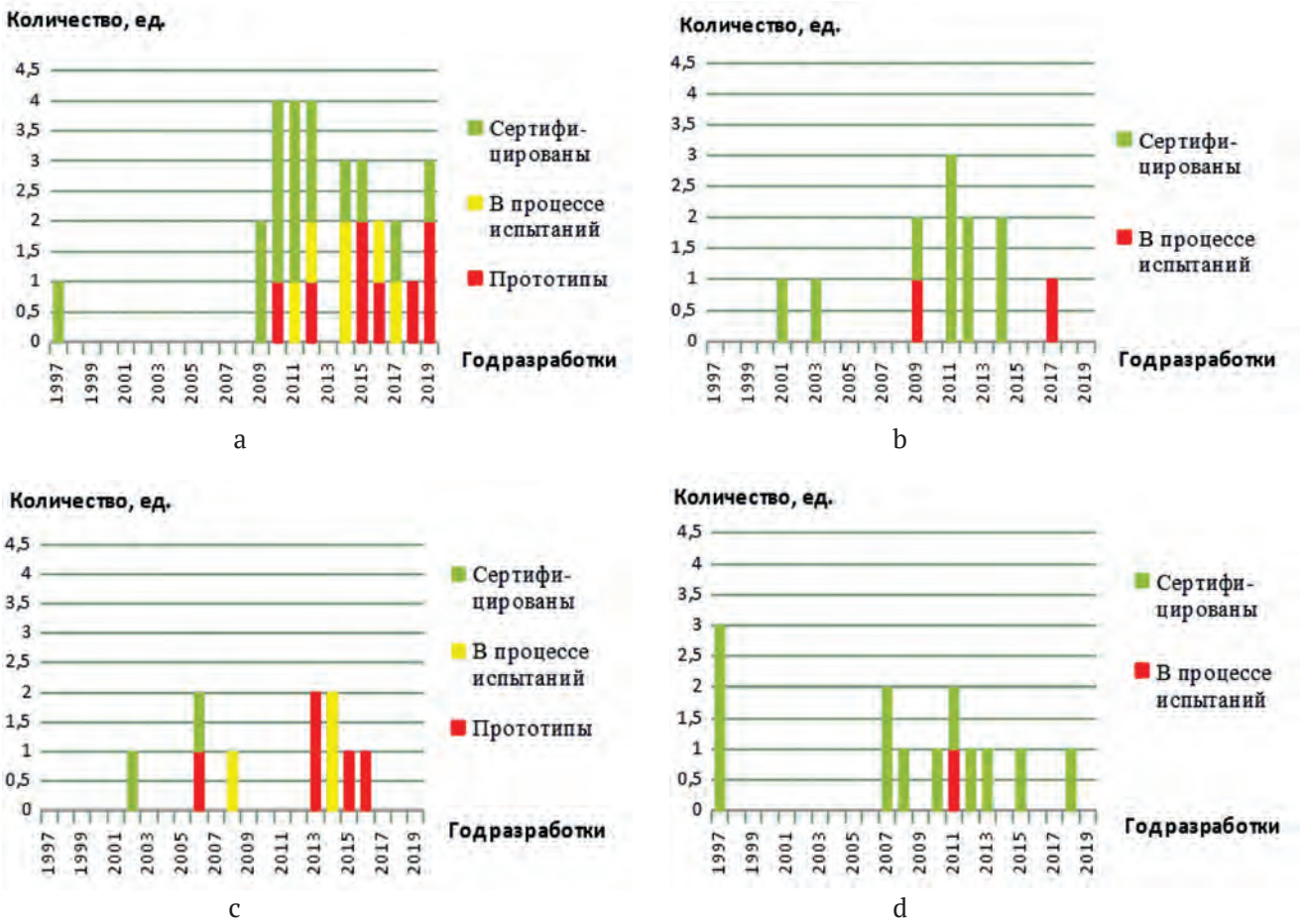


Рис. 4. Сведения об экзоскелетах по годам появления информации о них (разработки или прохождения ими процедуры сертификации).
a – НК мобильные; b – НК стационарные; c – ВК мобильные; d – ВК стационарные

Figure 4. Data on exoskeletons by the years of emergence of information on them (development or passings of the procedure of certification by them).
a – mobile for the lower limb; b – stationary for the lower limb; c – mobile for the upper limb; d – stationary for the upper limb

Анализ графиков на рисунках 3 и 4. Из полученных распределений видно, что мобильные экзоскелеты составляют 59% от общего количества. Мобильные экзоскелеты для нижних конечностей и таза (рисунок 4, a) представляют бóльший интерес для разработчиков – 42% от общего числа экзоскелетов (68% от количества мобильных экзоскелетов). Разработка стационарных экзоскелетов НК (рисунок 4, b) отличается стабильностью.

Разработка мобильных экзоскелетов для верхних конечностей и плечевого пояса (рисунок 4, c), помимо технических вопросов, заключается в решении вопроса организации подобной биотехнической системы с точки зрения удобства оператора. Вероятно поэтому, стационарные экзоскелеты ВК (рисунок 4, d) все еще имеют преимущество, в том числе за последние 10 лет (53% от общего количества экзоскелетов ВК). Пик появления прототипов мобильных экзоскелетов ВК с 2013 по 2016 г. демонстрирует, что в настоящее время осуществляется поиск технических решений, так как существующие технологии не обеспечивают возможность реализовать идеи. Два изделия уже находятся на стадии испытаний.

Рассмотрим перспективы развития экзоскелетов по другим направлениям классификации. На рисунке 5 представлена сводная информация по принципам управления экзоскелетов по годам разработки.

Анализ графика на рисунке 5. Доли экзоскелетов с адаптивным и комбинированным управлением равны и составляют почти по 22%. Ярко заметна смена парадигмы с разработки и внедрения адаптивных принципов управления на комбинированные. При этом с 2015 г. значительная доля представленных экзоскелетов разрабатывается с комбинированным принципом управления (более 66%).

На рисунке 6 более детально рассмотрена информация по экзоскелетам с адаптивным управлением.

Анализ гистограммы на рисунке 6 показывает, что примерно каждые 5 лет появляется информация о разработке экзоскелетов с использованием сигналов оператора в качестве задающих устройств систем управления экзоскелетами.

Рассмотрим аспект вовлеченности экзоскелета в реализуемое движение (рис. 7, без прототипов).

Анализ графика на рисунке 7 показывает, что наиболее часто встречаются пассивно-активные экзоскелеты (51,2%), реже активные (24,3%) и полуактивные (19,5%). Информация о пассивных экзоскелетах практически не встречалась.

География разработчиков представлена на рисунке 8.

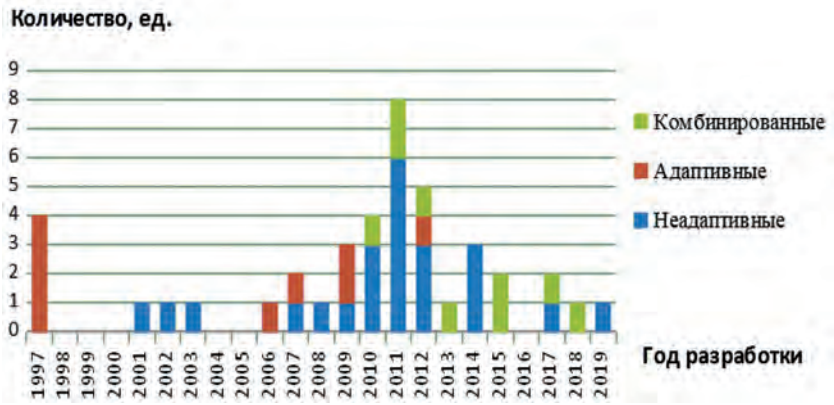


Рис. 5 График распределения экзоскелетов по принципам управления

Figure 5. Schedule of distribution of exoskeletons by the principles of management

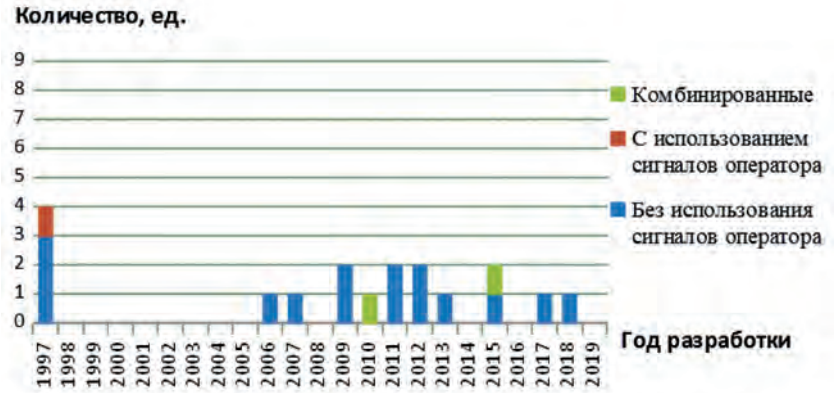


Рис. 6. Распределение экзоскелетов с адаптивным управлением по задающим сигналам адаптации

Figure 6. Distribution of exoskeletons with adaptive management on the setting adaptation signals

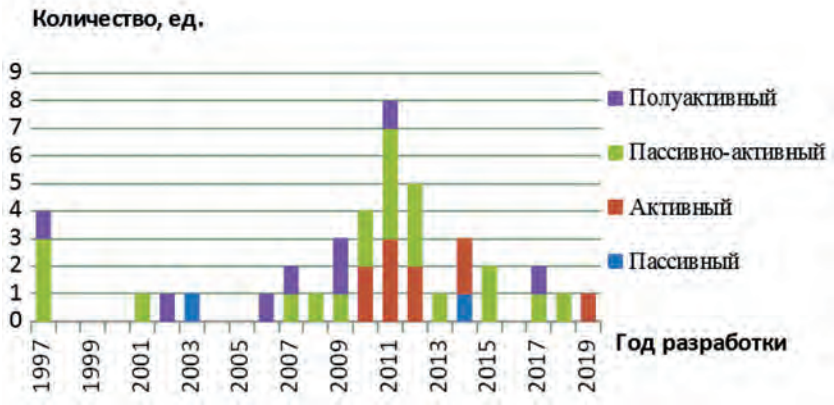


Рис. 7. Распределение экзоскелетов по степени вовлеченности экзоскелета в реализуемое движение

Figure 7. Distribution of exoskeletons on degree of the involvement of an exoskeleton into the realized movement

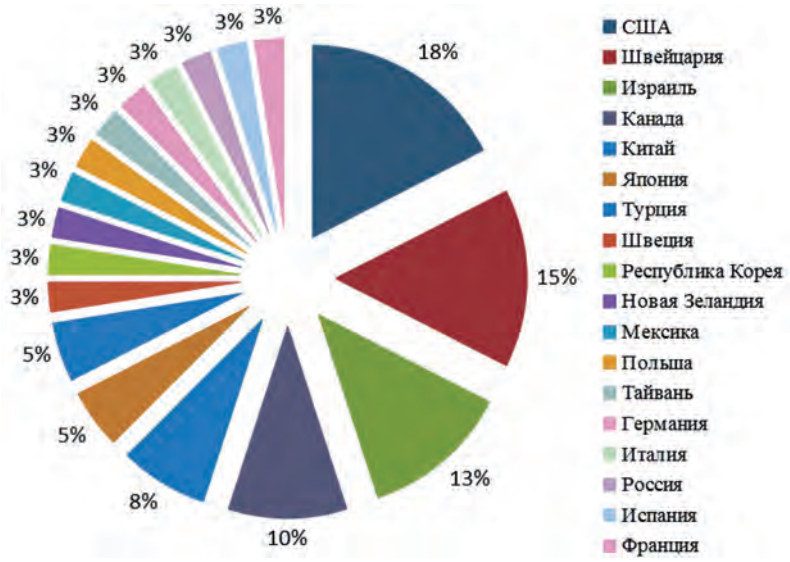


Рис. 8. География разработчиков экзоскелетов конечностей, информация о которых использовалась при анализе

Figure 8. Geography of the developers of exoskeletons of limbs, information on whom was used in the analysis

Анализ информации показал, что за рассматриваемый период с 1997 по 2019 г. тема разработки экзоскелетов была в различной степени проработана во многих странах. Большое количество стран-разработчиков не позволяет однозначно определить лидеров в рассматриваемом сегменте устройств для медицинской реабилитации.

Следующие тенденции наблюдались у конкретных экзоскелетов:

– мобильные НК – поддержка веса [11], [12], [41–45], создание адаптивного управления [15, 16], [18, 19], [39];

– мобильные ВК – разработка гибких экзоскелетов для уменьшения веса [13], [46–48];

– стационарные НК – VR, обратная связь [33], внедрение пассивно-активного управления (1–100%), разнообразность тренировок (ступеньки, различные движения для тренировки равновесия) [8], [28], [30];

– стационарные ВК – VR, обратная связь [8], [14].

Выводы

1. Рассмотрены существующие и разрабатываемые конструкции экзоскелетов верхних и нижних конечностей. Дополнены существующие классификации, предлагаемые различными авторами.

2. По принципу мобильности фокус разработчиков смещен в сторону мобильных экзоскелетов (59% от общего количества), по задействованным сегментам – для нижних конечностей и таза (42% от общего числа; 68% от количества мобильных экзоскелетов).

3. При анализе используемых принципов управления ярко заметна смена парадигмы с разработки и внедрения адаптивных принципов управления на комбинированные. Значительная доля представленных с 2015 г. экзоскелетов разрабатывается с комбинированным принципом управления (более 66%).

4. По степени вовлеченности экзоскелета в реализуемое движение чаще других встречаются пассивно-активные экзоскелеты (51,2%), реже активные (24,3%) и полуактивные (19,5%).

5. Определено направление развития экзоскелетов в настоящее время: пассивно-активные экзоскелеты, мобильные экзоскелеты нижних конечностей и таза, экзоскелеты с адаптивным комбинированным принципом управления.

Этика публикации: Представленная статья ранее опубликована не была.

Конфликт интересов: Информация о конфликте интересов отсутствует.

Источник финансирования: Финансирование за счет ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России.

Литература

1. Курдыбайло С.Ф., Пономаренко Г.Н., Евсеев С.П., Сусляев В.Г., Чекушина Г.В. Технические средства реабилитации для восстановления двигательной активности. - СПб. : ООО “Р-КОПИ”, 2018. - 120 с.
2. Воробьев А.А., Андрющенко Ф.А., Засыпкина О.А., Соловьева И.О., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Терминология и классификация экзоскелетов // Вестник ВолгГМУ/ - 2015 (55). - №3 С.71-78.
3. Брумштейн Ю. М. Экзоскелеты: анализ направлений развития и применений в медицинских технологиях / Ю. М. Брумштейн // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : труды XII Международной научной конференции (ФРЭМЭ’2016). – Владимир, 2016. – Книга 1. – С. 247–251.
4. URL: https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2015-02-24/html/2015-03692.htm (Дата посещения: 30.05.2019)
5. Романов И.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Развитие и современное состояние экзоскилетов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9-2. – С. 243-247.
6. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7300 (дата обращения: 07.05.2019).

7. Yeongyu P., Inseong J., Jeongsoo L., Joonbum B. (2018) A Dual-cable Hand Exoskeleton System for Virtual Reality. Mechatronics, Vol. 40, pp. 177—186.
8. Stewart A.M., Pretty C.G., Adams M., Chen X.Q. (2017) Review of Upper Limb Hybrid Exoskeletons. IFAC-PapersOnLine, Vol. 50, pp. 15169-15178.
9. Zimmerli L., Jacky M., Lünenburger L., Riener R., Bolliger M. (2013) Increasing Patient Engagement During Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 94: pp. 1737-1746.
10. Barbuto S., Stein J. (2019) Chapter 17 - Rehabilitation Robotics for Stroke. StrokeRehabilitation, pp. 235-247
11. URL: https://www.bioniklabs.com (Дата посещения: 30.05.2019)
12. URL:https://www.rexbionics.com (Дата посещения: 30.05.2019)
13. URL: https://global.honda (Дата посещения: 30.05.2019)
14. URL: https://www.bioservo.com (Дата посещения: 30.05.2019)
15. URL: https://www.hocoma.com/us/ (Дата посещения: 30.05.2019)
16. URL: https://www.alterg.com (Дата посещения: 30.05.2019)
17. URL: https://eksobionics.com (Дата посещения: 30.05.2019)
18. URL: https://www.exoatlet.com/ru (Дата посещения: 30.05.2019)
19. URL: https://www.cyberdyne.jp (Дата посещения: 30.05.2019)
20. URL: https://gogoa.eu (Дата посещения: 30.05.2019)
21. URL: http://www.indego.com/indego/en/home (Дата посещения: 30.05.2019)
22. URL: http://www.bamateknoloji.com (Дата посещения: 30.05.2019)
23. URL: http://www.b-temia.com/homepage/ (Дата посещения: 30.05.2019)
24. URL: https://www.suitx.com (Дата посещения: 30.05.2019)
25. URL: https://rewalk.com (Дата посещения: 30.05.2019)
26. URL: http://www.wearable-robotics.com/kinetek/ (Дата посещения: 30.05.2019)
27. URL: http://www.rehab-robotics.com/index.html (Дата посещения: 30.05.2019)
28. URL: https://myomo.com (Дата посещения: 30.05.2019)
29. URL: https://symbionix.ru/ru/ (Дата посещения: 30.05.2019)
30. URL: https://meditouch.co.il (Дата посещения: 30.05.2019)
31. URL: https://www.rehatechnology.com/en/ (Дата посещения: 30.05.2019)
32. URL: http://www.hdtglobal.com (Дата посещения: 30.05.2019)
33. URL: http://motorika.com (Дата посещения: 30.05.2019)
34. URL: http://walkbot.co.kr (Дата посещения: 30.05.2019)
35. URL: http://patosopatoson.wixsite.com/roki (Дата посещения: 30.05.2019)
36. URL: https://www.ottobockus.com (Дата посещения: 30.05.2019)
37. URL: https://www.japet.eu/en/ (Дата посещения: 30.05.2019)
38. URL: https://prodromus.pl (Дата посещения: 30.05.2019)
39. URL: http://www.freebionics.com.tw (Дата посещения: 30.05.2019)
40. URL: http://www.fftai.com/index_en.php (Дата посещения: 30.05.2019)
41. https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Otuc72A5Hj66u0_qANs7soik7xmYnUO-c494sIO9T_M/edit?usp=sharing
42. URL:http://robots.ihmc.us (Дата посещения: 30.05.2019)
43. URL:https://www.bioniklabs.com (Дата посещения: 30.05.2019)
44. URL:https://www.wandercraft.eu/en/ (Дата посещения: 30.05.2019)
45. URL:http://www.marsibionics.com (Дата посещения: 30.05.2019)
46. URL:https://www.exomed.org (Дата посещения: 30.05.2019)
47. URL: http://www.daiyak.co.jp/index.html (Дата посещения: 30.05.2019)
48. URL: https://wyss.harvard.edu (Дата посещения: 30.05.2019)
49. URL: http://www.bioeng.nus.edu.sg/EILab/index.html (Дата посещения: 30.05.2019)

References

1. Kurdybajlo S.F., Ponomarenko G.N., Evseev S.P., Suslyaev V.G., Chekushina G.V. Tekhnicheskie sredstva reabilitacii dlya vosstanovleniya dvigatel'noj aktivnosti [Technical means of rehabilitation for recovery of motor activity]. Saint-Petersburg: OOO "R-KOPI", 2018. - 120 p. (In Russian). https://elibrary.ru/item.asp?id=36374752
2. Vorob'ev A.A., Andryushchenko F.A., Zasypkina O.A., Solov'eva I.O., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M. Terminologiya i klassifikaciyaekzoskeletov [Terminology and classification of exoskeletons]. Vestnik VolgGMU [Bulletin Volga SMU]. 2015 (55). №3 ss. 71-78. (In Russian)
3. Brumshtejn YU.M. Ekzoskelety: analiznapravlenijrazvitiya i primenenij v medicinskihtekhnologiyah [Exoskeleton: an analysis of trends and applications in medical technologies]. Fizika i radioelektronika v medicine i ekologii : trudy XII Mezhdunarodnojnauchnojkonferencii (FREME'2016) [Physics and Radioelectronics in medicine and ecology : proceedings of the XII International scientific conference (FRAME'2016)]. Vladimir, 2016. – Kniga 1. – pp. 247–251. (In Russian)
4. URL: https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2015-02-24/html/2015-03692.htm
5. Romanov I.D., CHernyshov E.A., Romanova E.A. Razvitie i sovremennoe sostoyanie ekzoskiletov [Development and current state of exoskeletons]. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij [international journal of applied and fundamental research]. – 2015. – № 9-2. – pp. 243-247. (In Russian)
6. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7300 (дата обращения: 07.05.2019).
7. Yeongyu P., Inseong J., Jeongsoo L., Joonbum B. (2018) A Dual-cable Hand Exoskeleton System for Virtual Reality. Mechatronics, Vol. 40, pp. 177—186.
8. Stewart A.M., Pretty C.G., Adams M., Chen X.Q. (2017) Review of Upper Limb Hybrid Exoskeletons. IFAC-PapersOnLine, Vol. 50, pp. 15169-15178.
9. Zimmerli L., Jacky M., Lünenburger L., Riener R., Bolliger M. (2013) Increasing Patient Engagement During Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 94: pp. 1737-1746.
10. Barbuto S., Stein J. (2019) Chapter 17 - Rehabilitation Robotics for Stroke. StrokeRehabilitation, pp. 235-247

11. URL: https://www.bioniklabs.com(accessed: 30.05.2019)
12. URL:https://www.rexbionics.com (accessed: 30.05.2019)
13. URL: https://global.honda (accessed: 30.05.2019)
14. URL: https://www.bioservo.com (accessed: 30.05.2019)
15. URL: https://www.hocoma.com/us/ (accessed: 30.05.2019)
16. URL: https://www.alterg.com (accessed: 30.05.2019)
17. URL: https://eksobionics.com (accessed: 30.05.2019)
18. URL: https://www.exoatlet.com/ru (accessed: 30.05.2019)
19. URL: https://www.cyberdyne.jp (accessed: 30.05.2019)
20. URL: https://gogoa.eu (accessed: 30.05.2019)
21. URL: http://www.indego.com/indego/en/home (accessed: 30.05.2019)
22. URL: http://www.bamateknoloji.com (accessed: 30.05.2019)
23. URL: http://www.b-temia.com/homepage/ (accessed: 30.05.2019)
24. URL: https://www.suitx.com (accessed: 30.05.2019)
25. URL: https://rewalk.com (accessed: 30.05.2019)
26. URL: http://www.wearable-robotics.com/kinetek/ (accessed: 30.05.2019)
27. URL: http://www.rehab-robotics.com/index.html (accessed: 30.05.2019)
28. URL: https://myomo.com (accessed: 30.05.2019)
29. URL: https://symbionix.ru/ru/ (accessed: 30.05.2019). (In Russian).
30. URL: https://meditouch.co.il (accessed: 30.05.2019)
31. URL: https://www.rehatechnology.com/en/ (accessed: 30.05.2019)
32. URL: http://www.hdtglobal.com (accessed: 30.05.2019)
33. URL: http://motorika.com (accessed: 30.05.2019)
34. URL: http://walkbot.co.kr (accessed: 30.05.2019)
35. URL: http://patosopatoson.wixsite.com/roki (accessed: 30.05.2019)
36. URL: https://www.ottobockus.com (accessed: 30.05.2019)
37. URL: https://www.japet.eu/en/ (accessed: 30.05.2019)
38. URL: https://prodromus.pl (accessed: 30.05.2019)
39. URL: http://www.freebionics.com.tw (accessed: 30.05.2019)
40. URL: http://www.fftai.com/index_en.php (accessed: 30.05.2019)
41. https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Otuc72A5Hj66u0_qANs7soik7xmYnUO-c494sIO9T_M/edit?usp=sharing
42. URL:http://robots.ihmc.us (accessed: 30.05.2019)
43. URL:https://www.bioniklabs.com (accessed: 30.05.2019)
44. URL:https://www.wandercraft.eu/en/ (accessed: 30.05.2019)
45. URL:http://www.marsibionics.com (accessed: 30.05.2019)
46. URL:https://www.exomed.org (accessed: 30.05.2019). (In Russian).
47. URL: http://www.daiyak.co.jp/index.html (accessed: 30.05.2019)
48. URL: https://wyss.harvard.edu (accessed: 30.05.2019)
49. URL: http://www.bioeng.nus.edu.sg/EILab/index.html (accessed: 30.05.2019)

Рукопись поступила / Received: 31.05.2019
Принята в печать / Accepted for publication: 29.07.2019

Авторы

Щербина Константин Константинович — доктор медицинских наук, директор Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России, Бестужевская улица, дом 50, Санкт-Петербург, 195067, Российская Федерация; e-mail: shcherbina180@mail.ru

Головин Михаил Андреевич — магистр по специальности «Техническая физика», руководитель отдела инновационных технологий технических средств реабилитации Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России, Бестужевская улица, дом 50, Санкт-Петербург, 195067, Российская Федерация; e-mail: golovin@center-albreht.ru

Золотухина Марина Владимировна — магистр по специальности «Техническая физика», младший научный сотрудник Института протезирования и ортезирования ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России, Бестужевская улица, дом 50, Санкт-Петербург, 195067, Российская Федерация

Authors

Konstantin K. Shcherbina, Grand PhD in Medical sciences (Dr. Med. Sci), Director of the Institute of Prosthetics and Orthotics of the Federal Scientific Center of Rehabilitation of the Disabled named after G.A. Albrecht, Bestuzhevskaya Street 50, 195067 Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: shcherbina180@mail.ru

Mihail A. Golovin, Master of Applied Physics, Head of the Labouratory of the Institute of Prosthetics and Orthotics of the Federal Scientific Center of Rehabilitation of the Disabled named after G.A. Albrecht, Bestuzhevskaya Street 50, 195067 Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: golovin@center-albreht.ru

Marina V. Zolotukhina, Master of Applied Physics, junior researcher of the Institute of Prosthetics and Orthotics of the Federal Scientific Center of Rehabilitation of the Disabled named after G.A. Albrecht, Bestuzhevskaya Street 50, 195067 Saint Petersburg, Russian Federation.