

Физиологические методики в изучении «пассивных» промышленных экзоскелетов спины и нижних конечностей

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина», ул. Балтийская, 8, Москва, 125315

В выборке из 566 работ, связанных с применением пассивных индустриальных экзоскелетов спины и нижних конечностей, используется ограниченное число физиологических методов. Наиболее часто (~56%) применяется электромиография. В большинстве случаев смысл применения физиологических методов концептуально связан с оценкой снижения нагрузки на мышцы, изучением параметров двигательной активности у человека в экзоскелете. Малоиспользуемым направлением остается изучение центральных влияний, обусловленных применением данного типа устройств.

Ключевые слова: экзоскелет; функциональное состояние; электромиография; профилактика рисков; методика оценки; влияние

Для цитирования: Бабанов Н.Д., Кубряк О.В. Физиологические методики в изучении «пассивных» промышленных экзоскелетов спины и нижних конечностей. *Мед. труда и пром. экол.* 2020; 60 (5). <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-5-318-328>

Для корреспонденции: Кубряк Олег Витальевич, зав. лаб. физиологии функциональных состояний человека ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина», д-р биол. наук. E-mail: o.kubryak@nphys.ru

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 19.03.2020 / **Дата принятия к печати:** 20.04.2020 / **Дата публикации:** 18.05.2020

Nikita D. Babanov, Oleg V. Kubryak

Physiological methods in the study of “passive” industrial exoskeletons of the back and lower extremities

P.K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russian Federation, 125315

A limited number of physiological methods are used in a sample of 566 studies related to the use of passive industrial exoskeletons of the back and lower extremities. Electromyography is used most often (~56%). In most cases, the meaning of using physiological methods is conceptually related to the assessment of reducing the load on the muscles, studying the parameters of motor activity in a person in an exoskeleton. The study of the general influences caused by the use of this type of device remains a little-used direction.

Keywords: exoskeleton; functional state; electromyography; risk prevention; assessment methodology; impact

For citation: Babanov N.D., Kubryak O.V. Physiological methods in the study of “passive” industrial exoskeletons of the back and lower extremities. *Med. труда i prom. ecol.* 2020; 60 (5). <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-5-318-328>

For correspondence: Oleg V. Kubryak, head of the laboratory of physiology of human functional states of Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Dr. of Sci. (Biol.). E-mail: o.kubryak@nphys.ru

ORCID: Babanov N.D. 0000-0003-0999-8818, Kubryak O.V. 0000-0001-7296-5280

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 19.03.2020 / **Accepted:** 20.04.2020 / **Published:** 18.05.2020

Введение. Интерес к средствам, повышающим двигательные возможности человека, всегда являлся одним из ведущих мотивов для исследований в спорте, медицине труда, медицинской реабилитации, геронтологии и других. На современном уровне развития технологий широко обсуждаемым техническим решением, от которого ожидают существенной пользы — при погрузочно-разгрузочных работах, переносе тяжестей на большие расстояния, ручном труде в промышленных процессах [1], а также в медицинской реабилитации [2] — являются экзоскелеты [3,4]. К экзоскелетам обычно относят закрепляемые на теле и конечностях человека силовые конструкции, принимающие на себя часть нагрузки. Современный уровень производства позволяет, используя новые методы (например, 3D-печать из биосов-

Introduction. Interest in the means that increase human motor capabilities has always been one of the leading motives for research in sports, occupational health, medical rehabilitation, gerontology, and others. At the modern level of technology development, exoskeletons are a widely discussed technical solution that is expected to be of significant use — for loading and unloading operations, long-distance weight transfer, manual labor in industrial processes [1], as well as in medical rehabilitation [2–4]. Exoskeletons usually include power structures that are attached to the body and limbs of a person and take part of the load. The modern level of production allows us to create complex kinematic systems using new methods (for example, 3D printing from biocompatible PLA-plastics [5]). Their properties are designed to promote

местимых PLA-пластиков [5]), создавать сложные кинематические системы. Их свойства конструируются так, чтобы содействовать физиологически верным движениям нижних [6] и верхних [7] конечностей человека, «усилить» естественный опорно-двигательный аппарат. При наличии движителя экзоскелеты называют «активными» [8] или, если движитель отсутствует, то «пассивными» [9]. Пассивные экзоскелеты могут включать механизмы, накапливающие потенциальную энергию, например, пружины. Как правило, такие устройства используют фазу сгибания конечности во время движения человека для накопления и освобождают накопленную энергию во время разгибания. Или просто обеспечивают облегчение статических нагрузок, например, при вынужденных позах. Пассивные системы обычно имеют не большой вес, но при этом обеспечивают повышение эффективности при выполнении физической работы [10].

Сегодня существует большое число решений, нацеленных на повышение силы [11], снижение нагрузки [12], медицинскую реабилитацию как в России [13], так и за рубежом [14]. В этой связи актуализируются вопросы изучения физиологических влияний, «медицинских эффектов» от применения экзоскелетов [15]. Проводятся различные исследования, нацеленные на использование биосигналов (от пользователя) для управления устройством. Варианты формулировок целей исследований: изучение реабилитационных эффектов для функции ходьбы [16]; исследование кортикальных процессов методом электроэнцефалографии (ЭЭГ) в различных условиях ходьбы для классификации типов походки [17]; исследование нейронных процессов декодирования человеческой походки в среде виртуальной реальности с обратной связью [18]; исследование переходных процессов с помощью поверхностной электромиографии (ЭМГ) [19].

По мере распространения экзоскелетов и роста их разнообразия, актуализируются проблемы стандартизации. В том числе, востребованы рекомендации для логичных и надежных способов медико-биологических испытаний с использованием физиологических методик: ЭМГ, ЭЭГ, стабилотрии и других. В России отдельные меры стандартизации только начинают разрабатываться, например, в рамках Технического Комитета 320 Росстандарта — для промышленных экзоскелетов. Выбор физиологических методик, целеполагание и корректное проведение исследований являются важной частью работ по определению реального места и адекватного внедрения любых типов экзоскелетов в практику. На материале, связанном с известными промышленными экзоскелетами, подготовлен краткий обзор, цель которого связана с ориентирующим описанием обычно применяемых сегодня физиологических методик.

Материалы и методы исследования. Применялся контент-анализ релевантных публикаций. Отбор работ базировался на предлагаемых классификациях [20] — анализировались журнальные статьи, где изучались устройства, определяемые как «пассивные экзоскелеты». Подготовка обзора включала три этапа.

На первом была выбрана база серийно выпускаемых промышленных пассивных экзоскелетов — каталог «Exoskeleton Report» [21]. Выбор этого ресурса связан с его самоопределением как «полностью волонтерской организации, специализирующейся на экзоскелетах», независимой от производителей устройств. В качестве релевантных были выбраны 14 устройств (рис. 1).

На втором этапе с помощью сервиса «Гугл Академия» (Google Scholar) анализировался массив тематических

physiologically correct movements of the lower [6] and upper [7] human limbs, “strengthen” the natural musculoskeletal system. In the presence of a propellant, exoskeletons are called “active” [8] or, if there is no propellant, “passive” [9]. Passive exoskeletons can include mechanisms that store potential energy, such as springs. Typically, such devices use the flexion phase of the limb during human movement to accumulate and release stored energy during extension. Or simply provide relief from static loads, for example, when forced poses. Passive systems are usually not very heavy, but they provide an increase in efficiency when performing physical work [10].

Today, there are a large number of solutions aimed at increasing strength [11], reducing the load [12], and medical rehabilitation both in Russia [13] and abroad [14]. In this regard, the issues of studying the physiological effects, “medical effects” from the use of exoskeletons are updated [15]. Various studies are being conducted aimed at using biosignals (from the user) to control the device. The wording of the objectives of the research: to study the rehabilitation effects for the walking functions [16]; research of cortical processes using electroencephalography (EEG) in various walking conditions for classification of gait types [17]; research of neural processes of decoding human gait in a virtual reality environment with feedback [18]; research of transient processes using surface electromyography (EMG) [19].

With the spread of exoskeletons and the growth of their diversity, the problems of standardization become more relevant. We believe that recommendations are in demand for logical and reliable methods of biomedical testing using physiological techniques: EMG, EEG, stabilometry, and others. In Russia, separate standardization measures are just beginning to be developed, for example, within the framework of the Technical Committee 320 of Rosstandart — for industrial exoskeletons. The choice of physiological methods, goal setting and correct research are an important part of the work to determine the real place and adequate implementation of any types of exoskeletons in practice. Based on the material associated with well-known industrial exoskeletons, a brief review has been prepared, the purpose of which is related to the orienting description of commonly used today physiological techniques.

Materials and methods of research. Content analysis of relevant publications was used. The selection of papers was based on the proposed classifications [20] — measures are just beginning to be developed magazine articles were analyzed, where devices defined as “passive exoskeletons” were studied. The review was prepared in three stages.

At the first stage, a database of commercially produced industrial passive exoskeletons was selected — the “Exoskeleton Report” catalog [21]. The choice of this resource is related to its self-determination as a “fully volunteer organization specializing in exoskeletons”, independent of device manufacturers. 14 devices were selected as relevant (Figure 1).

At the second stage, the Google Scholar service was used to analyze an array of thematic publications up to 2015, concerning all the devices found at the first stage. In the found publications there were those in which there is research using physiological methods. The main search areas are: electromyography (EMG), cardiorythmography, heart rate monitoring, gyroscopy, stabilometry, plantography, ergospirometry, motion visualization. The choice was based on implicit knowledge and subsequent visual identification of keywords in PubMed publications using the “Similar articles” option for biomedical articles using exoskeletons. 566 relevant publications were identified. Then the total number of references to a particular

публикаций глубиной до 2015 г., касающийся всех найденных на первом этапе устройств. В найденных публикациях находились те, в которых есть проведение исследований с помощью физиологических методик. Основные направления для поиска: электромиография (ЭМГ), кардиоритмография, пульсометрия, гироскопия, стабиллометрия, плантография, эргоспирометрия, визуализация движений. Выбор был обусловлен имплицитным знанием и последующим визуальным выявлением ключевых слов в публикациях базы PubMed с помощью опции «похожие публикации» (Similar articles) для биомедицинских статей с применением экзоскелетов. Было установлено 566 релевантных публикаций. Далее в найденных работах подсчитывалось общее количество упоминаний конкретного устройства, затем проводилась селекция источников по каждому из вышеописанных методов. Так как отбор проводился по ключевым словам, то возможно упоминание нескольких разных методов в одном источнике. Схема представлена на рисунке. То есть исследовалось число упоминаний различных физиологических методик применительно к каждому найденному устройству.

Третий (обобщающий) этап включал свободный ознакомительный поиск дополнительных источников в базах PubMed, Российской Государственной Библиотеки, «Киберленинке» и Научной электронной библиотеке (elibrary.ru), связанных с дополнением и обсуждением полученных данных — для поиска использовались ключевые слова, связанные с материалом, полученным на предыдущих этапах.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 схематически изображен процесс поиска и отбора публикаций по каждому из производителей. В скобках указано количество статей, в которых есть упоминание выделенного метода.

Наиболее часто применяемой методикой в анализируемом массиве публикаций оказалась поверхностная ЭМГ — 56% из описанных физиологических методик. На втором месте по распространенности — силовые платформы, 12%. Стоит отметить, что для некоторых производителей (например, *Fortis* и *Chairless Chair*) характерно очень широкое использование данного метода в своих работах, что может создавать некоторый «перекос» для доли этого метода. Остальные методы имели примерно одинаковую частоту появления в научных публикациях, как правило, 6–10%. Наименее упоминаемым в выборке был метод эргоспирометрии — примерно 1%. Абсолютные значения приведены на рисунке 1. Таким образом, в прошедшее пятилетие лидирующей физиологической методикой при исследовании взаимодействия человека с «пассивными» экзоскелетами можно считать поверхностную ЭМГ.

Объяснение выбора исследователями выявленных методик, скорее всего, связано с уровнем сознательно применяемых физиологических и биомеханических концепций, объясняющих смысл и возможную физиологическую эффективность экзоскелета. Прежде всего, сегодня имеют хождение биомеханические и кибернетические модели, заложенные в середине и конце XX века. Например, идеи представления вертикально стоящего человека как «перевернутого маятника» [22] — в разных вариантах [23]. Кроме таких механистических взглядов на регуляцию позы, очевидно влияние системных идей Н.А. Бернштейна [24], более известных на Западе из советского наследия.

Предложенная Н.А. Бернштейном теория [25] описывала уровни построения движения, предполагая вовлечен-

device was calculated in the found works, and then the sources were selected for each of the methods described above. Since the selection was based on keywords, it is possible to mention several different methods in the same source. The diagram is shown in the figure. In other words, the number of mentions of various physiological techniques in relation to each device found was investigated.

The third (generalizing) stage included a free introductory search for additional sources in the databases of PubMed, the Russian State Library, Cyberleninka, and the Scientific electronic library (elibrary.ru), related to the addition and discussion of the obtained data — keywords related to the material obtained in the previous stages were used for the search.

Results and discussion. Figure 1 schematically shows the process of searching and selecting publications for each of the manufacturers. The number of articles that mention the selected method is shown in parentheses.

The most frequently used method in the analyzed array of publications was surface EMG — 56% of the described physiological methods. Power platforms are the second most common, with 12%. It is worth noting that some manufacturers (for example, *Fortis* and *Chairless Chair*) are characterized by a very wide use of this method in their work, which may create a certain “bias” for the share of this method. The other methods had approximately the same frequency of appearance in scientific publications, usually 6–10%. The least mentioned method in the sample was ergospirometry-about 1%. The absolute values are shown in Figure 1. Thus, in the past five years, the leading physiological method for studying human interaction with “passive” exoskeletons can be considered surface EMG.

The explanation of the researchers' choice of the identified methods is most likely related to the level of consciously applied physiological and biomechanical concepts that explain the meaning and possible physiological effectiveness of the exoskeleton. First of all, biomechanical and cybernetic models that were established in the middle and end of the XX century are in use today. For example, the idea of representing a vertically standing person as an “inverted pendulum” [22] — in different versions [23]. In addition to such mechanistic views on the regulation of posture, the influence of N. A. Bernstein's system ideas is obvious [24], better known in the West from the soviet heritage.

The theory proposed by N. A. Bernstein [25] described the levels of movement construction, assuming the involvement of various levels of the central nervous system in regulation. For example, according to such views, effects on the thalamo-pallidar level — analysis of proprioceptive signaling, when using an exoskeleton, can probably contribute to the transmission of different from natural information, which, in turn, can affect the nature of efferent synthesis and, as a result, changes in muscle activity. As well as the well-known ideas of P.K. Anokhin [26], these concepts, we believe, represent biological adaptations of a more formalized theory of automatic control, future cybernetic concepts. In turn, this contributes to better acceptance by engineers who design exoskeletons. Industrial exoskeletons are designed to increase efficiency, productivity and safety by affecting human motor capabilities. Purposeful movement of a person is closely related to postural regulation, during which the necessary “program” of the required movement is formed. Reflex arcs that pass through the spinal cord are neural circuits that respond to afferent signaling. Such responses may be the basis of a set of stereotypical move-

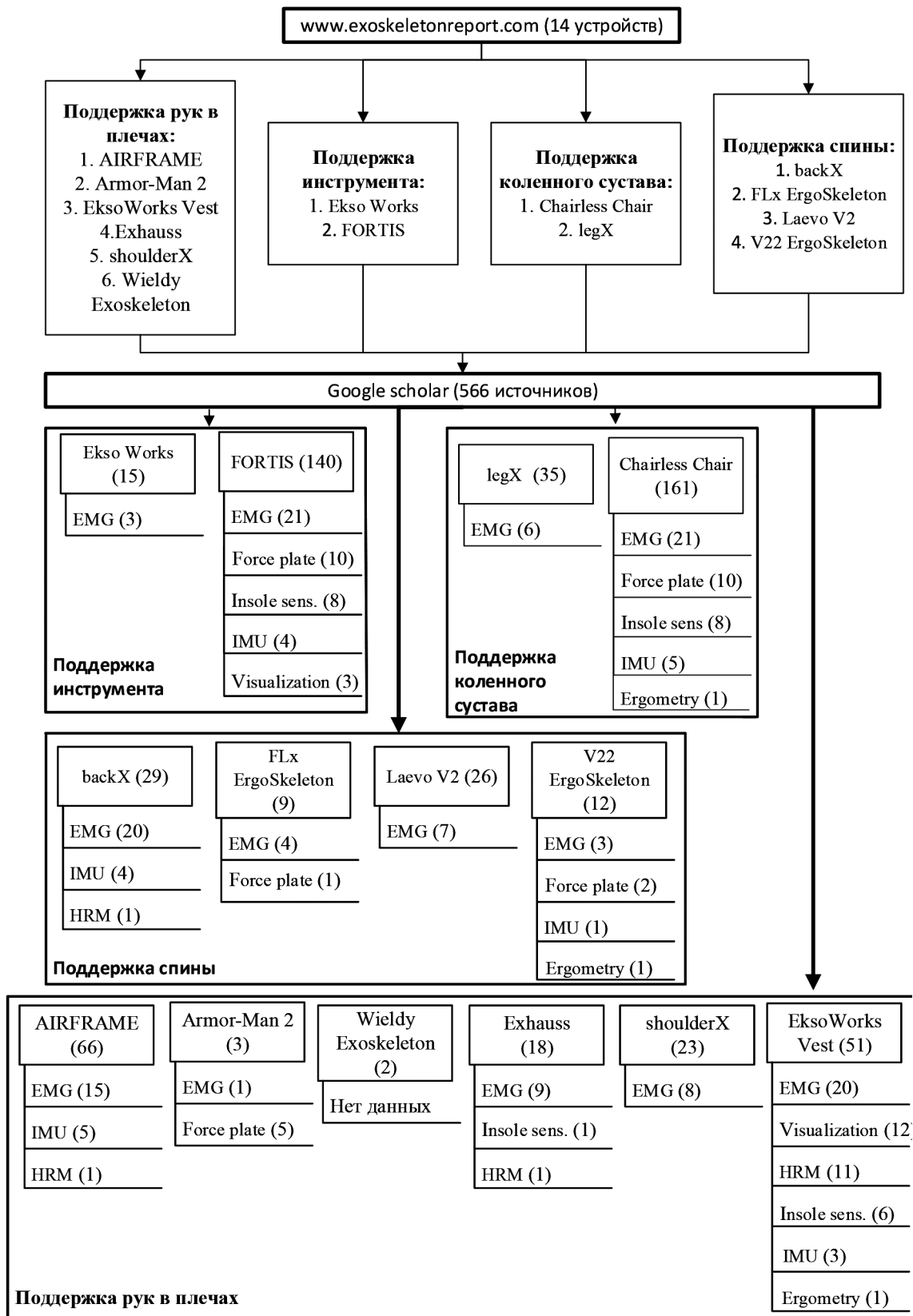


Рис. 1. Схема поиска и селекции релевантных публикаций в системе «Гугл Академия» в связи с конкретными техническими решениями. Используются оригинальные английские названия устройств и методик (пояснение в тексте).

Fig. 1. Scheme of search and selection of relevant publications in the Google Academy system in connection with specific technical solutions. The original English names of devices and methods are used (explanation in the text).

ность различных уровней центральной нервной системы в регуляцию. Например, согласно таким взглядам, влияния на таламо-паллидарный уровень — анализ проприоцептивной сигнализации при использовании экзоскелета, вероятно, может способствовать передаче отличной от естественной информации, что, в свою очередь, может повлиять на характер эфферентного синтеза и, как следствие, на изменение мышечной активности. Также как и широко известные идеи П.К. Анохина [26]. Эти концепции представляют собой биологические адаптации более формализованной теории автоматического управления, будущих кибернетических концепций. В свою очередь, это способствует лучшему принятию их инженерами, проектирующими экзоскелеты. Промышленные экзоскелеты предназначены для повышения эффективности, производительности и безопасности труда путем влияния на двигательные возможности человека. Целенаправленное движение человека тесно связано с позной регуляцией, во время которой формируется необходимая «программа» потребного движения. Рефлекторные дуги, проходящие в спинном мозге, представляют из себя нейронные цепи, отвечающие на афферентную сигнализацию. Такие ответы могут лежать в основе набора стереотипных движений [27]. Изменение нейронной активности, в зависимости от выполняемой «программы», регулирует начало или окончание движения. То есть наличие дополнительных технических средств здесь может приводить к изменению функциональных состояний человека, за счет развития адаптаций к новым условиям. Влияния экзоскелета, очевидно, имеют физиологические эффекты, что подразумевает возможность объективной оценки состояний человека. Наличие возможных взаимосвязей между оцениваемыми количественными параметрами может предоставить базу для системной оценки, «физиологического качества» разрабатываемых устройств.

Что касается конкретных экзоскелетов, практики их изучения, можно отметить, например, российский *ExoChair* [28], прошедший апробацию в областной клинической больнице Ростова-на-Дону. Устройство, представляющее из себя систему разгрузки мышц ног и спины, помогло хирургу провести операцию длительностью 12 часов. По сообщению пресс-службы «Северстали» [29], компания «Воркутауголь» провела испытания экзоскелета, созданного в «Норильском никеле». Устройство позволяет переносить груз весом до 60 килограммов. Как следует из проведенного анализа, оценкой подобных устройств занимается много зарубежных лабораторий. При применении экзоскелета *Chairless Chair* наблюдались изменения функциональных состояний добровольцев [30]. Помимо субъективной оценки (с помощью опросника), применялся метод эргоспирометрии под нагрузкой на беговой дорожке, а также во время задач, имитирующих профессиональную деятельность. Благодаря устройству значительно снижалась нагрузка на мышцы во время проведения работ и улучшались показатели эргоспирометрии. Однако конструктивные особенности нередко влияют на субъективное восприятие устройства. Например, опрос показал низкий уровень ощущения безопасности во время перемещения и появление отвлекающего шума от устройства. Одной из причин, авторы статьи считают отсутствие предварительного обучения. Можно предполагать, что необходимость адаптации к изменившемуся контролю баланса тела, могут снижать ощущение безопасности. Наоборот, лежащие в основе сохранения вертикальной позы нейронные механизмы, связанные с угрозой, могут повлиять на

ments [27]. The change in neural activity, depending on the “program” being executed, regulates the beginning or end of the movement. That is, the presence of additional technical means here can lead to changes in the functional state of a person, due to the development of adaptations to new conditions. The effects of the exoskeleton obviously have physiological effects, which implies the possibility of an objective assessment of human conditions. The presence of possible relationships between the estimated quantitative parameters can provide a basis for a systematic assessment of the “physiological quality” of the devices being developed.

As for specific exoskeletons and the practice of studying them, we can note, for example, the Russian *ExoChair* [28], which was tested at the regional clinical hospital of Rostov-on-don. The device, which is a system for unloading the muscles of the legs and back, helped the surgeon to perform an operation lasting 12 hours. According to the press service of Severstal [29], “Vorkutaugol” has tested an exoskeleton created in “Norilsk Nickel”. The device allows you to carry a load weighing up to 60 kilograms. As follows from the analysis, many foreign laboratories are engaged in evaluating such devices. When using the exoskeleton of the Chairless Chair, changes in the functional states of volunteers were observed [30]. In addition to the subjective assessment (using a questionnaire), the method of ergospirometry was used under load on a treadmill, as well as during tasks that simulate professional activity. Thanks to the device, the load on the muscles during the work was significantly reduced and the ergospirometry indicators improved. However, design features often affect the subjective perception of the device. For example, the survey showed a low sense of security while moving and the appearance of distracting noise from the device. One of the reasons, the authors of the article consider the lack of preliminary training. It can be assumed that the need to adapt to the changed balance control of the body may reduce the feeling of security. Conversely, the threat-related neural mechanisms underlying vertical posture retention may affect balance control and increase the sensitivity of the sensory systems involved in balance, which may lead to increased muscle responses in the lower extremities and in the trunk muscles [31,32]. This reaction can probably have consequences in metabolic processes, since there is a need to overcome additional resistance on the part of the device and implement a new motor program [33]. A similar study was conducted with the Dutch exoskeleton Laevo [34]. During the study, bioelectric signals of the muscles of the back, abdomen and legs were recorded during a long-bent position with the body tilted forward. The index of muscle tension decreased by 35%, as well as the feeling of discomfort in the lower back when wearing an exoskeleton, increased the endurance time when maintaining a pose on average from 3 to 9 minutes. At the same time, there was discomfort in the chest area, which can affect long-term wear of the device. There are large differences in the ability of skeletal muscles when they change their length, and when they are static [35]. One hypothesis states that increasing the stiffness of the muscle in a relaxed state helps it maintain stability against external forces that occur unexpectedly [36]. There is a specific behavior of the muscles — thixotropy. With increased muscle activity, greater stability is no longer required, so muscle stiffness is reduced due to

контроль баланса и повысить чувствительность сенсорных систем, участвующих в балансе, что может привести к увеличению мышечных реакций нижних конечностей и в мышцах туловища [31,32]. Такая реакция, вероятно, может иметь последствия в метаболических процессах, так как возникает необходимость в преодолении дополнительного сопротивления со стороны устройства, реализации новой двигательной программы [33].

Похожее исследование проводилось с нидерландским экзоскелетом *Laevo* [34]. Во время исследования регистрировались биоэлектрические сигналы мышц спины, живота и ног при длительном согнутом положении с наклоном корпуса вперед. На 35% снизился показатель напряжения мышц, также снизилось ощущение дискомфорта в пояснице при ношении экзоскелета, увеличилось время выносливости при поддержании позы в среднем с 3 до 9 минут. В тоже время, отмечался дискомфорт в области грудной клетки, что может сказываться при длительном ношении устройства.

Существуют большие различия в способности скелетных мышц, когда они изменяют свою длину, и когда они статичны [35]. Одна из гипотез утверждает, что повышение жесткости мышцы в расслабленном состоянии помогает ей поддерживать устойчивость против внешних сил, возникающих неожиданно [36]. Возникает специфическое поведение мышц — тиксотропия. При повышении активности мышцы большая стабильность уже не требуется, поэтому жесткость мышцы уменьшается благодаря эффекту тиксотропии. Таким образом, возможность снизить напряжение мышц нижних конечностей, вероятно, может способствовать улучшению постурального контроля при использовании экзоскелета при длительных статичных нагрузках.

По шкалам индивидуального восприятия нагрузки Борга и шкалам Лайкерта, а также с помощью датчиков *Kinect* оценивалось влияние полужесткого американского экзоскелета *ErgoSkeleton* на пользователя [37]. Задача состояла в подъеме коробки весом 10% и 20% веса испытуемого. Производился видео захват движений для оценки биомеханики движений. Показано, что по субъективному ощущению при 20% нагрузке усилие воспринимается меньше, чем при 10%. Отмечается возможность несущественного увеличения нагрузки на коленный сустав в течение длительного времени при подъеме большего веса. Для облегчения схвата коробки используются дополнительные фиксирующие тросы на руках. При использовании такого устройства без тросов меньше ухудшается биомеханика коленного и тазового суставов. При возникновении боли в коленном суставе уменьшается мышечная активность мышц бедра во время походки, подъема по лестнице и движении вперед. Кроме того, боль в колене влияет на спинномозговой рефлекс и скорость возбуждения двигательных нейронов четырехглавой мышцы бедра [38].

Для оценки влияния экзоскелетов на облегчение работы при поднятых руках проведено наблюдение с использованием пассивного экспериментального экзоскелета, состоящего из трех сегментов: спина, поддержка для каждой из рук [39]. Участники исследования в течение 30 секунд удерживали над головой груз на фиксированной высоте. Регистрировались показания сигналов ЭМГ двухглавой мышцы плеча и дельтовидной мышцы. Для субъективной оценки использовалась шкала Борга, местное восприятие давления и шкалы удобства использования. Показано, что для мышц бицепса руки нагрузка снизилась на 49%, для дельтовидной мышцы на 62%. Половина участников исследования оценила удобство ис-

the thixotropy effect. Thus, the ability to reduce muscle tension in the lower extremities can probably contribute to improved postural control when using an exoskeleton under prolonged static loads. The effect of the semi-rigid American *ErgoSkeleton* exoskeleton on the user was evaluated using the individual Borg load perception scales and Likert scales, as well as *Kinect* sensors [37]. The task was to lift the box weighing 10% and 20% of the weight of the subject. Video capture of movements was performed to evaluate the biomechanics of movements. It is shown that according to the subjective feeling at 20% of the load, the force is perceived less than at 10%. There is a possibility of insignificant increase in the load on the knee joint for a long time when lifting more weight. To facilitate the grip of the box, additional fixing cables are used on the hands. When using such a device without cables, the biomechanics of the knee and pelvic joints deteriorates less. When pain occurs in the knee joint, the muscle activity of the hip muscles decreases during gait, climbing stairs and moving forward. In addition, knee pain affects the spinal reflex and the rate of excitation of motor neurons of the quadriceps femur [38]. To assess the effect of exoskeletons on the facilitation of work with raised arms, an observation was made using a passive experimental exoskeleton consisting of three segments: the back, support for each of the arms [39]. Participants in the study held a load above their head at a fixed height for 30 seconds. Readings of EMG signals of the biceps and deltoid muscles were recorded. The Borg scale, local pressure perception, and usability scales were used for subjective evaluation. It is shown that for the biceps muscles of the arm, the load decreased by 49%, for the deltoid muscle by 62%. Half of the study participants rated the device's usability as acceptable. A subjective assessment showed that the subjects' weight was perceived to be lower than the real one, as well as the pressure on their hands. The authors of the study note that this type of exoskeleton in the absence of additional weight did not significantly affect the increase in muscle activity of the legs and trunk, which would indicate an increase in load. At the same time, the question of improving the ergonomics of the device and optimizing the weight and size remains open. A similar study was conducted with the *EksoVest* exoskeleton [40], which is a similar device to the American *Levitator Airframe*, which was tested at the BMW plant [41,42]. The task of the volunteers was to simulate professional activity at the factory. EMG readings from the anterior deltoid and middle deltoid muscles were recorded. The Borg scale was used for subjective evaluation. It was shown that the exoskeleton did not cause a strong feeling of discomfort. Muscle tension decreased by an average of 45%. The time required to complete tasks that simulate drilling has been reduced by 20%. However, there is an increase in errors during the simulation of professional activity. This behavior may be related to the user's lack of experience using these types of devices. The effect on the legs was not evaluated. Limitations in joint movements were also assessed. It shows a 30% reduction in pressure on the spine during professional activity. The speed of movement of the general center of pressure in the anterior-posterior direction increased by 12%, which indicates a decrease in postural control in the sagittal plane. The area of movement of the shoulder joint decreased by 10%.

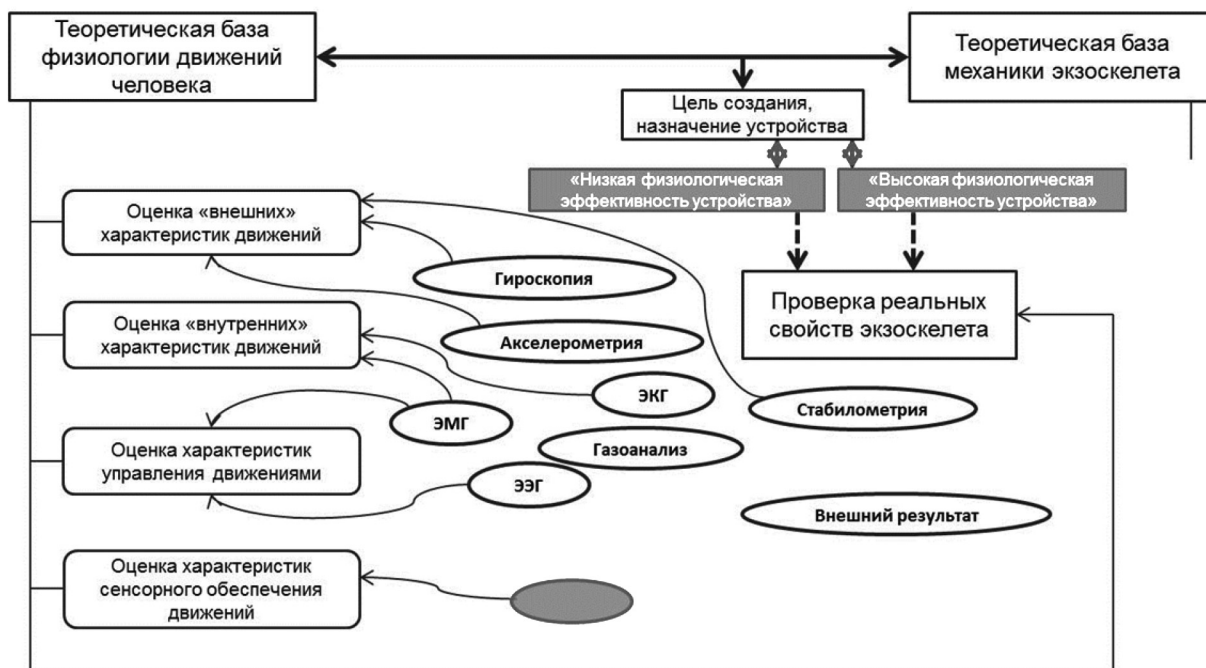


Рис. 2. Фрагмент упрощенной «когнитивной карты» применения физиологических методов в оценке свойств экзоскелетов. Пояснения в тексте.

Fig. 2. A fragment of a simplified “cognitive map” of the application of physiological methods in assessing the properties of exoskeletons. Explanations in the text.

пользования устройства как приемлемое. Субъективная оценка показала, что у испытуемых вес воспринимался ниже реального, так же, как и давление на руки. Авторы исследования отмечают, что такой вид экзоскелета при отсутствии дополнительного веса не оказывал значительного влияния на увеличение мышечной активности ног и туловища, что свидетельствовало бы об увеличении нагрузки.

В тоже время остается открытым вопрос об улучшении эргономики устройства и оптимизации веса и размеров. Аналогичное исследование проведено с экзоскелетом EksoVest [40], являющийся схожим устройством с американским Levitate Airframe, прошедший апробацию на заводе BMW [41,42]. Задача добровольцев заключалась в имитации профессиональной деятельности на заводе. Регистрировались показания ЭМГ с передних дельтовидных мышц и средних дельтовидных мышц. Для субъективной оценки использовалась шкала Борга. Показано, что экзоскелет не вызывал ощущения сильного дискомфорта. Напряжение мышц снизилось, в среднем, на 45%. Время выполнения задач, имитирующих бурения, уменьшилось на 20%. Однако отмечается увеличение ошибок во время проведения имитации профессиональной деятельности. Возможно, такое поведение можно связать с отсутствием опыта у пользователя в использовании подобного рода устройств. Влияние на ноги не оценивалось. Также оценивались ограничения в движениях суставов. Показано снижение давления на позвоночник на 30% во время профессиональной деятельности. Поввысилась скорость движения общего центра давления в переднезаднем направлении на 12%, что указывает на снижение постурального контроля в сагиттальной плоскости. Область движения плечевого сустава уменьшилась на 10%.

Возможное обобщение применения разных физиологических методик и других, отдельных описаний, примеров

A possible generalization of the application of various physiological techniques and other, separate descriptions, examples can be presented in the form of a fragment of a kind of “cognitive map” — Figure 2.

Figure 2 shows separate methods-EMG, ECS, stabilometry, and others that are often included in the protocols for evaluating the effects of exoskeleton use. The conditional definition of “physiological efficiency of the device” here is associated with compliance with the purpose of using the exoskeleton, for example, the degree of load reduction when manipulating a load. In this sense, the same device may have different degrees of efficiency for different tasks. This requires the development of special monitoring protocols even if the same method is used, for example, EMG [43].

Remain unexplored region concerning the central effects, multi-touch support. Analysis is usually limited to physiological parameters directly related to the kinematic properties of the exoskeleton. However, an important reserve for the growth of knowledge about the impact of the exoskeleton on a person, the applicability of the device in a case, is the search in these little-explored areas.

Conclusions:

1. Evaluation of impacts of industrial passive exoskeletons on functional state of a person is usually conditional on two areas — the study of relatively “external” and “internal” characteristics of movements that are associated with a certain “mechanism”, the adoption of simplified representations of man as a mechanical system. At the same time, the most common physiological method for studying the effects of the exoskeleton in the analyzed sample of publications is EMG.

2. An important reserve for the development of knowledge about the effects of exoskeletons on humans, improving the quality and functionality of devices is the study of the Central provision of posture and movement regulation. In this regard, new, little-used

можно представить в виде фрагмента своеобразной «когнитивной карты» — рисунок 2.

На рисунке 2 отмечены отдельные методики — ЭМГ, ЭКГ, стабилметрия и другие, часто входящие в протоколы оценки влияний от применения экзоскелетов. Условное определение «физиологическая эффективность устройства» здесь связывается с соответствием цели применения экзоскелета, например, степени снижения нагрузки при манипулировании грузом. Одно и то же устройство может в этом смысле иметь разную степень эффективности в случае разных задач. Это требует разработки специальных протоколов наблюдения даже в случае применения одного и того же метода, например, ЭМГ [43].

Малоисследованными остаются области, касающиеся центральных влияний, сенсорного обеспечения. Анализ обычно ограничивается прямо связанными с кинематическими свойствами экзоскелета физиологическими параметрами. Однако важным резервом для роста знаний о влиянии экзоскелета на человека, применимости устройства в том или ином случае, является поиск в указанных малоисследованных областях.

Выводы:

1. Оценка влияний индустриальных «пассивных» экзоскелетов на функциональные состояния человека проводится обычно по двум условным направлениям — изучению условно «внешних» и «внутренних» характеристик движений, что связано с определенной «механистичностью», принятием упрощенных представлений о человеке как о механической системе. При этом наиболее распространенным физиологическим методом при исследовании влияний экзоскелета в анализируемой выборке публикаций является ЭМГ.

2. Важным резервом для развития знаний о влияниях экзоскелетов на человека, повышению качества и функциональности устройств является исследование центрального обеспечения регуляции позы и движений. В этой связи перспективными представляются новые, пока мало используемые физиологические подходы, а также разработка специфических протоколов с применяющимися способами регистрации физиологических сигналов для оценки экзоскелетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schmalz, T., Schändlinger, J., Schuler, M., Bornmann, J., Schirrmeister, B., Kannenberg, A., & Ernst, M. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(23): 4792. DOI: 10.3390/ijerph16234792.
- Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Котов С.В., Аведиков Г.Е., Митрофанов И.Е., Толстов К.М., Ефаров В.А. Клинико-биомеханическое обоснование применения экзоскелета «Экзоатлет» при ходьбе больных с последствиями ишемического инсульта. *Russian Journal of Biomechanics/Rossijski Zurnal Biomehaniki*. 2019; 23(2). DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2019.2.04.
- Masood J., Dacal-Nieto A., Alonso-Ramos V., Fontano M.I., Voilqué A., Bou J. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process. *Wearable Robotics: Challenges and Trends*. 2018; 234–8. DOI: 10.1007/978-3-030-01887-0_45.
- Kim S., Moore A., Srinivasan D., Akanmu A., Barr A., Harris-Adamson C., Nussbaum M. A. Potential of Exoskeleton Technologies to Enhance Safety, Health, and Performance in Construction: Industry Perspectives and Future Research Directions. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2019; 1–10. DOI: 10.1080/24725838.2018.1561557.

physiological approaches are promising, as well as the development of specific protocols with used methods for registering physiological signals for evaluating exoskeletons.

REFERENCES

- Schmalz, T., Schändlinger, J., Schuler, M., Bornmann, J., Schirrmeister, B., Kannenberg, A., & Ernst, M. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(23): 4792. DOI: 10.3390/ijerph16234792
- Pismennaya, E.V., Petrushanskaya K.A., Kotov S.V., Avedikov G.E., Mitrofanov I.E., Tolstov K.M., Efarov V.A. Clinical and biomechanical justification for the use of the exoskeleton “Exoatlet” when walking patients with the consequences of ischemic stroke. *Russian Journal of Biomechanics/Rossijski Zurnal Biomehaniki*. 2019; 23(2). DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2019.2.04
- Masood J., Dacal-Nieto A., Alonso-Ramos V., Fontano M. I., Voilqué A., Bou J. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process. *Wearable Robotics: Challenges and Trends*. 2018; 234–238. DOI: 10.1007/978-3-030-01887-0_45
- Kim S., Moore A., Srinivasan D., Akanmu A., Barr A., Harris-Adamson C., Nussbaum M. A. Potential of Exoskeleton Technologies to Enhance Safety, Health, and Performance in Construction: Industry Perspectives and Future Research Directions. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2019; 1–10. DOI: 10.1080/24725838.2018.1561557
- Dudley, D. R., Knarr, B. A., Siu, K.-C., Peck, J., Ricks, B., & Zuniga, J. M. Testing of a 3D printed hand exoskeleton for an individual with stroke: a case study. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2019: 1–5. DOI: 10.1080/17483107.2019.1646823
- Ao, D., Song, R., & Gao, J. Movement Performance of Human — Robot Cooperation Control Based on EMG-Driven Hill-Type and Proportional Models for an Ankle Power-Assist Exoskeleton Robot. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2017; 25(8): 1125–1134. DOI: 10.1109/tnsre.2016.2583464
- Ma Z., Ben-Tzvi P., Danoff J. Hand Rehabilitation Learning System With an Exoskeleton Robotic Glove. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2016; 24(12): 1323–32. DOI: 10.1109/tnsre.2015.2501748
- Vega Ramirez A., Kurita Y. A Soft Exoskeleton Jacket with Pneumatic Gel Muscles for Human Motion Interaction. *Universal Access in Human-Computer Interaction. Multimodality and Assistive Environments*. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11573. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23563-5_46
- Koopman A.S., Kingma I., Faber G.S., de Looze M.P., van Dieën J.H. Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *Journal of biomechanics*. 2019; 83: 97–103. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.033
- Masood J., Ortiz J., Fernández J., Mateos L.A., Caldwell D.G. Mechanical design and analysis of light weight hip joint Parallel Elastic Actuator for industrial exoskeleton. *Proceedings of the 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*. 2016; 6: 631–6.
- Yu H., Choi I.S., Han K.-L., Choi J.Y., Chung G., Suh J. Development of a Stand-alone Powered Exoskeleton Robot Suit in Steel Manufacturing. *ISIJ International*, 2015; 55(12), 2609–17. DOI: 10.2355/isijinternational.isijint-2015-272
- von Glinski A, Yilmaz E, Mrotzek S, Marek E, Jettkant B, Brinkemper A, Fisahn C, Schildhauer TA, Geßmann J. Effectiveness of an on-body lifting aid (HAL® for care support) to reduce lower back muscle activity during repetitive lifting tasks. *J Clin Neurosci*. 2019; 63: 249–55. DOI: 10.1016/j.jocn.2019.01.038

5. Dudley D.R., Knarr B.A., Siu K.-C., Peck J., Ricks B., & Zuniga J.M. Testing of a 3D printed hand exoskeleton for an individual with stroke: a case study. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2019; 1–5. DOI: 10.1080/17483107.2019.1646823.
6. Ao, D., Song, R., & Gao, J. Movement Performance of Human — Robot Cooperation Control Based on EMG-Driven Hill-Type and Proportional Models for an Ankle Power-Assist Exoskeleton Robot. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2017; 25(8): 1125–34. DOI: 10.1109/tnsre.2016.2583464.
7. Ma Z., Ben-Tzvi P., Danoff J. Hand Rehabilitation Learning System With an Exoskeleton Robotic Glove. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2016; 24(12): 1323–32. DOI: 10.1109/tnsre.2015.2501748.
8. Vega Ramirez A., Kurita Y. A Soft Exoskeleton Jacket with Pneumatic Gel Muscles for Human Motion Interaction. *Universal Access in Human-Computer Interaction. Multimodality and Assistive Environments*. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11573. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23563-5_46.
9. Koopman A.S., Kingma I., Faber G.S., de Looze M.P., van Dieën J.H. Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *Journal of biomechanics*. 2019; 83: 97–103. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.033.
10. Masood J., Ortiz J., Fernández J., Mateos L.A., Caldwell D.G. Mechanical design and analysis of light weight hip joint Parallel Elastic Actuator for industrial exoskeleton. *Proceedings of the 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*. 2016; 6: 631–6.
11. Yu H., Choi I.S., Han K.-L., Choi J.Y., Chung G., Suh J. Development of a Stand-alone Powered Exoskeleton Robot Suit in Steel Manufacturing. *ISIJ International*, 2015; 55(12), 2609–17. DOI: 10.2355/isijinternational.isijint-2015-272
12. von Glinzki A., Yilmaz E., Mrotzek S., Marek E., Jettkant B., Brinkemper A., Fisahn C., Schildhauer T.A., Geßmann J. Effectiveness of an on-body lifting aid (HAL® for care support) to reduce lower back muscle activity during repetitive lifting tasks. *J Clin Neurosci*. 2019; 63: 249–55. DOI: 10.1016/j.jocn.2019.01.038
13. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2015; 7 (2); 185–97.
14. Bos R.A., Haarman C.J., Stortelder T., Nizamis K., Herder J.L., Stienen A.H., Plettenburg D.H. A structured overview of trends and technologies used in dynamic hand orthoses. *J Neuroeng Rehabil*. 2016; 13(1): 62. DOI: 10.1186/s12984-016-0168-z
15. Jayaraman A., O'Brien M.K., Madhavan S., Mummidisetty C.K., Roth H.R., Hohl K., Tapp A., Brennan K., Kocherginsky M., Williams K.J., Takahashi H., Rymer W.Z. Stride management assist exoskeleton vs functional gait training in stroke: A randomized trial. *Neurology*. 2019 Jan 15; 92(3): e263-e273. DOI: 10.1212/WNL.0000000000006782.
16. Husain S.R., Ramanujam A., Momeni K., Forrest G.F. Effects of Exoskeleton Training Intervention on Net Loading Force in Chronic Spinal Cord Injury. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2018; 7: 2793–2796. DOI: 10.1109/EMBC.2018.8512768.
17. Goh S.K., Abbass H.A., Tan K.C., Al-Mamun A., Thakor N., Bezerianos A., Li J. Spatio-Spectral Representation Learning for Electroencephalographic Gait-Pattern Classification. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2018; 26(9): 1858–67. DOI: 10.1109/TNSRE.2018.2864119.
18. Luu T.P., He Y., Brown S., Nakagame S., Contreras-Vidal J.L. Gait adaptation to visual kinematic perturbations using a real-time closed-loop brain-computer interface to a virtual reality avatar. *J Neural Eng*. 2016; 13(3): 036006. DOI: 10.1088/1741-2560/13/3/036006
19. Vorob'ev A.A., Andryushchenko F.A., Zasypkina O.A., Solov'eva I.O., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M. Terminology and classification of exoskeletons. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. 2015; 7 (2): 185–97 (in Russian).
20. Bos R.A., Haarman C.J., Stortelder T., Nizamis K., Herder J.L., Stienen A.H., Plettenburg D.H. A structured overview of trends and technologies used in dynamic hand orthoses. *J Neuroeng Rehabil*. 2016; Jun 29;13(1): 62. DOI: 10.1186/s12984-016-0168-z
21. Jayaraman A., O'Brien M.K., Madhavan S., Mummidisetty C.K., Roth H.R., Hohl K., Tapp A., Brennan K., Kocherginsky M., Williams K.J., Takahashi H., Rymer W.Z. Stride management assist exoskeleton vs functional gait training in stroke: A randomized trial. *Neurology*. 2019 Jan 15; 92(3):e263-e273. DOI: 10.1212/WNL.0000000000006782
22. Husain S.R., Ramanujam A., Momeni K., Forrest G.F. Effects of Exoskeleton Training Intervention on Net Loading Force in Chronic Spinal Cord Injury. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2018; 7: 2793–6. DOI: 10.1109/EMBC.2018.8512768
23. Goh S.K., Abbass H.A., Tan K.C., Al-Mamun A., Thakor N., Bezerianos A., Li J. Spatio-Spectral Representation Learning for Electroencephalographic Gait-Pattern Classification. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2018 Sep; 26(9):1858–1867. DOI: 10.1109/TNSRE.2018.2864119
24. Luu T.P., He Y., Brown S., Nakagame S., Contreras-Vidal J.L. Gait adaptation to visual kinematic perturbations using a real-time closed-loop brain-computer interface to a virtual reality avatar. *J Neural Eng*. 2016 Jun; 13(3): 036006. DOI: 10.1088/1741-2560/13/3/036006
25. Ho Chit Siu, Julie A. Shah, Leia A. Stirling. Classification of Anticipatory Signals for Grasp and Release from Surface Electromyography. *Sensors (Basel)*. 2016 Nov; 16(11): 1782. DOI: 10.3390/s16111782.
26. Vorob'ev A.A., Andryushchenko F.A., Zasypkina O.A., Solov'eva I.O., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M. Terminology and classification of exoskeletons. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. 2015; 7 (2): 185–97 (in Russian).
27. Exoskeleton Report. *Industrial*. <https://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/industrial/>.
28. D.A. Winter. Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol*. 1998; 80(3): 1211–21.
29. Song H., H. Park, S. Park A. springy pendulum could describe the swing leg kinetics of human walking. *J Biomech*. 2016; 49(9): 1504–1509. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2016.03.018
30. Profeta VLS, Turvey MT. Bernstein's levels of movement construction: A contemporary perspective. *Hum Mov Sci*. 2018 Feb;5 7:111–133. DOI: 10.1016/j.humov.2017.11.013
31. Bernshhteyn N.A. *On the construction of movements*. Moskva: Meditsina; 1947 (in Russian).
32. Sudakov K.V. Theory of Functional Systems: A Keystone of Integrative Biology. In: Nadin M. (eds) *Anticipation: learning from the past. The Russian/Soviet Contributions to the Science of Anticipation*. Springer, Cham Switzerland; 2015. ISBN: 978-3-319-19446-2. [DOI: 10.1007/978-3-319-19446-2]
33. Anokhin P.K. *Essays on the physiology of functional systems*. Moskva: Meditsina; 1975 (in Russian).
34. Sberbank pomog sozdat' ekzoskelet dlya khirurgov. <http://sk.ru/news/b/press/archive/2019/03/12/sberbank-pomog-sozdat-ekzoskelet-dlya-hirurgov.aspx>
35. Vorkutaugol' protestirovala opytnyy obrazets ekzoskeleta. <https://neftegaz.ru/news/auto/484219-vorkutaugol-protestirovala-opytnyy-obrazets-ekzoskeleta/>.
36. Wearable posture assisting device Patent South Korea № KR20160048885A.

19. Ho Chit Siu, Julie A. Shah, Leia A. Stirling. Classification of Anticipatory Signals for Grasp and Release from Surface Electromyography. *Sensors (Basel)*. 2016; 16(11): 1782. DOI: 10.3390/s16111782.
20. Воробьев А.А., Андриященко Ф.А., Засыпкина О.А., Соловьева И.О., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Терминология и классификация экзоскелетов. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2015; 7 (2): 185–97.
21. ExoskeletonReport. *Industrial*. <https://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/industrial/>
22. D.A. Winter. Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol*. 1998; 80(3): 1211–21.
23. Song H., H. Park, S. Park A. springy pendulum could describe the swing leg kinetics of human walking. *J Biomech*. 2016; 49 (9): 1504–1509. DOI: 10.1016/j.jbiomech. 2016.03.018.
24. Profeta VLS, Turvey MT. Bernstein's levels of movement construction: A contemporary perspective. *Hum Mov Sci*. 2018 Feb; 57: 111–33. DOI: 10.1016/j. humov. 2017.11.013.
25. Бернштейн Н.А. *О построении движений*. М.: Медицина; 1947.
26. Sudakov K.V. Theory of Functional Systems: A Keystone of Integrative Biology. In: Nadin M. (eds) *Anticipation: learning from the past. The Russian/Soviet Contributions to the Science of Anticipation*. Springer, Cham Switzerland. 2015. ISBN: 978–3–319–19446–2. DOI: 10.1007/978–3–319–19446–2.
27. Анохин П.К. *Очерки по физиологии функциональных систем*. М.: Медицина, 1975.
28. Сбербанк помог создать экзоскелет для хирургов. <http://sk.ru/news/b/press/archive/2019/03/12/sberbank-pomog-sozdat-ekzoskelet-dlya-hirurgov.aspx>.
29. Воркутауголь протестировала опытный образец экзоскелета <https://neftgaz.ru/news/auto/484219-vorkutaugol-protestirovala-opytnyy-obrazets-ekzoskeleta/>.
30. Wearable posture assisting device Patent South Korea № KR20160048885A.
31. de Souza N.S., Martins A.C., Alexandra D.J., Orsini M., Bastos V.H., Laite M.A., Teixeira S., Velasques B., Ribeiro P., Bittencourt J., Matta A.P., Filho P.M. The influence of fear of falling on orthostatic postural control: a systematic review. *Neurol Int*. 2015; 7: 62–5.
32. Lim S.B., Cleworth T.W., Horslen B.C., Blouin J.S., Inglis J.T., Carpenter M.G. Postural threat influences vestibular-evoked muscular responses. *J Neurophysiol*. 2017 Feb 1; 117(2): 604–11. DOI: 10.1152/jn. 00712.2016.
33. Chang S. R., Kobetic R., Triolo R. J. Effect of exoskeletal joint constraint and passive resistance on metabolic energy expenditure: Implications for walking in paraplegia. *PLOS ONE*, 2017; 12(8): e0183125. DOI: 10.1371/journal. pone. 0183125.
34. Bosch T, van Eck J, Knitel K., de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*. 2016; 54: 212–7. DOI: 10.1016/j. apergo. 2015.12.003.
35. Vernooij C. A., Reynolds R. F., Lakie M. Physiological tremor reveals how thixotropy adapts skeletal muscle for posture and movement. *Royal Society Open Science*. 2016; 3(5). DOI: 10.1098/rsos. 160065.
36. Altman D., Minozzo F.C., Rassier D.E. Thixotropy and Rheopexy of Muscle Fibers Probed Using Sinusoidal Oscillations. *PLOS ONE*. 2015; 10(4), e0121726. DOI: 10.1371/journal. pone. 0121726.
37. DeBusk H., Babski-Reeves K., Chander H. Preliminary Analysis of StrongArm® Ergoskeleton on Knee and Hip Kinematics and User Comfort. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2017; 61(1): 1346–50. DOI: 10.1177/1541931213601820.
31. de Souza N.S., Martins A.C., Alexandra D.J., Orsini M., Bastos V.H., Laite M.A., Teixeira S., Velasques B., Ribeiro P., Bittencourt J., Matta A.P., Filho P.M. The influence of fear of falling on orthostatic postural control: a systematic review. *Neurol Int*. 2015; 7: 62–5.
32. Lim S.B., Cleworth T.W., Horslen B.C., Blouin J.S., Inglis J.T., Carpenter M.G. Postural threat influences vestibular-evoked muscular responses. *J Neurophysiol*. 2017 Feb 1; 117(2): 604–11. DOI: 10.1152/jn. 00712.2016.
33. Chang S. R., Kobetic R., Triolo R. J. Effect of exoskeletal joint constraint and passive resistance on metabolic energy expenditure: Implications for walking in paraplegia. *PLOS ONE*, 2017; 12(8): e0183125. DOI: 10.1371/journal. pone. 0183125.
34. Bosch T, van Eck J, Knitel K., de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*. 2016; 54: 212–7. DOI: 10.1016/j. apergo. 2015.12.003.
35. Vernooij C. A., Reynolds R. F., Lakie M. Physiological tremor reveals how thixotropy adapts skeletal muscle for posture and movement. *Royal Society Open Science*. 2016; 3(5). DOI: 10.1098/rsos. 160065.
36. Altman D., Minozzo F.C., Rassier D.E. Thixotropy and Rheopexy of Muscle Fibers Probed Using Sinusoidal Oscillations. *PLOS ONE*. 2015; 10(4), e0121726. DOI: 10.1371/journal. pone. 0121726.
37. DeBusk H., Babski-Reeves K., Chander H. Preliminary Analysis of StrongArm® Ergoskeleton on Knee and Hip Kinematics and User Comfort. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2017; 61(1): 1346–50. DOI: 10.1177/1541931213601820.
38. Shiozawa S., Hirata R.P., Graven-Nielsen T. Center of Pressure Displacement of Standing Posture during Rapid Movements is Reorganized Due to Experimental Lower Extremity Muscle pain. *PLoS One*. 2015; 10(12): e0144933. DOI: 10.1371/journal. pone. 0144933.
39. Huysamen K., Bosch T, de Looze M., Stadler K. S., Graf E., O'Sullivan L. W. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 148–55. DOI: 10.1016/j. apergo. 2018.02.009.
40. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I., Alemi M.M., Alabdulkarim S., Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I — “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 315–322. DOI: 10.1016/j. apergo. 2018.02.025.
41. Renner T. Exoskeleton with Lightweight Plastic Components Finds Applications in Medicine, Manufacturing, and Agriculture. *Plastics Engineering*. 2018; 74(3): 30–5. DOI: 10.1002/j. 1941–9635.2018.tb01855.x.
42. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I., Alemi M. M., Jia B., Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II — “Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 323–330. DOI: 10.1016/j. apergo. 2018.02.024.
43. Kubryak O.V., Bagdasar'yan N.G., Glazachev O.S. et al. Researcher and physician tools: boundaries of achievable results and impact on research findings. *Based on materials from the round table at the Wayne Readings*. 2018; 6: 365–85. DOI: 10.14515/monitoring. 2018.6.17.

38. Shiozawa S., Hirata R.P., Graven-Nielsen T. Center of Pressure Displacement of Standing Posture during Rapid Movements Is Reorganised Due to Experimental Lower Extremity Muscle Pain. *PLoS One*. 2015; 10(12): e0144933. DOI: 10.1371/journal.pone.0144933.

39. Huysamen K., Bosch T., de Looze M., Stadler K. S., Graf E., O'Sullivan L. W. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 148–55. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.009.

40. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I., Alemi M.M., Alabdulkarim S., Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I — “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 315–22. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.025.

41. Renner T. Exoskeleton with Lightweight Plastic Components Finds Applications in Medicine, Manufacturing, and Agriculture. *Plastics Engineering*. 2018; 74(3): 30–5. DOI: 10.1002/j.1941-9635.2018.tb01855.x.

42. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I., Alemi M.M., Jia B., Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II — “Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 323–30. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.024.

43. Кубряк О.В., Багдасарьян Н.Г., Глазачев О.С. и др. Инструменты исследователя и врача: границы достижимых результатов и влияние на выводы исследований. По материалам круглого стола на Вейновских чтениях, 10 февраля 2018 года. К 120-летию П.К. Анохина. *Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены*. 2018; 6: 365–85. DOI: 10.14515/monitoring.2018.6.17.