



НИИ
ОРГАНИЗАЦИИ
ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
И МЕДИЦИНСКОГО
МЕНЕДЖМЕНТА

ЭКСПЕРТНЫЙ ОБЗОР

Технологии
ассистивной
биомехатроники



МОСКВА
2020

Научно-исследовательский институт организации
здравоохранения и медицинского менеджмента
Департамента здравоохранения города Москвы

Е. И. Аксенова, Н. Н. Камынина, С. Ю. Горбатов

ЭКСПЕРТНЫЙ ОБЗОР
**«ТЕХНОЛОГИИ АССИСТИВНОЙ
БИОМЕХАТРОНИКИ»**

Москва
2020

УДК 369.223.214:57.089
ББК 51.1(2)2
Т 38

Авторы:
Е. И. Аксенова, Н. Н. Камынина, С. Ю. Горбатов

Т 38 Экспертный обзор «Технологии ассистивной биомехатроники» /
Е. И. Аксенова, Н. Н. Камынина, С. Ю. Горбатов –
М.: ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ», 2020. – 48 с.

Издание подготовлено для использования службами Департамента
здравоохранения города Москвы.

УДК 369.223.214:57.089
ББК 51.1(2)2

©ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ», 2020
© Коллектив авторов, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глоссарий	4
Введение	7
1. Ключевые элементы биомехатронных устройств	9
1.1. Принципы работы биомехатронных устройств	9
1.2. Исполнительные механизмы и сенсоры	10
2. Биомехатронные ассистивные устройства	13
2.1. Бионические ткани, искусственные органы и имплантаты	13
2.2. Протезные устройства	19
2.3. Вспомогательные устройства	25
2.4. Нейрокомпьютерные интерфейсы	33
3. Развитие ассистивных биомехатронных технологий в России	35
4. Использование ассистивных технологий биомехатроники в системе здравоохранения города Москвы	40
Заключение	42
Список источников	44
Для заметок	48

Актюатор	исполнительное устройство, компонент машины, который отвечает за перемещение и управление механизмом или системой
Антропоморфный	человекообразный
Ассистивные технологии	вспомогательные, адаптивные и реабилитационные устройства для людей с ограниченными возможностями или пожилых людей
Аутологичный	термин применяется для обозначения трансплантации, при которой ткань для пересадки берется у самого реципиента
Ацеллюлярный	бесклеточный
Биомехатроника	прикладная междисциплинарная наука, направленная на интеграцию биологии и мехатроники (электротехника, электроника и машиностроение)
Биоинспирированный	вдохновленный решениями, найденными в биологических системах
Биомиметический	относящийся к искусственным процессам, веществам, устройствам или системам, имитирующим природу
Бионический	применяющий биологические методы и системы, найденные в природе, для изучения и проектирования инженерных систем и современных технологий
Внеклеточный матрикс	внеклеточные структуры, составляющие основу соединительной ткани, обеспечивающие механическую поддержку клеток и транспорт химических веществ
Демпфирование	искусственное подавление колебаний в механических, электрических и других системах
Детергентный	очищающий
Децеллюляризация	процедура очистки тканей, соединительно-тканых комплексов, органов в целом, трансплантируемых реципиенту, от клеточного компонента различными способами (физическими, ферментативными и химическими) с целью получения неиммуногенной, эффективной и безопасной конструкции на основе естественного внеклеточного матрикса

ДЦП	детский церебральный паралич
Иммуносупрессия	угнетение иммунитета по той или иной причине
Имплантат	медицинское устройство, изготовленное для замены отсутствующей биологической структуры, поддержки поврежденной биологической структуры или улучшения существующей биологической структуры
Интактный	неповрежденный, не вовлеченный в какой-либо процесс
Композит	многокомпонентный материал, изготовленный из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые в сочетании приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов и не являющимися простой их суперпозицией
Кохлеарный имплантат	хирургически имплантированное нейропротезирующее устройство, обеспечивающее человеку с умеренной или глубокой нейросенсорной потерей слуха модифицированное чувство звука
Локомоция	перемещение человека в пространстве (в водной среде, воздушной среде, по твердой поверхности, в плотной среде), обусловленное активными действиями
Метаматериал	специальный композиционный материал, который создается искусственной модификацией внедряемых в него элементов
Мехатроника	междисциплинарная отрасль техники, которая фокусируется на проектировании как электрических, так и механических систем, а также включает в себя комбинацию робототехники, электроники, компьютеров, телекоммуникаций, систем управления и проектирования изделий
Нативный	естественный, натуральный, не поврежденный при исследовании
Неинвазивный	не связанный с проникновением через естественные внешние барьеры организма
Нейробиология	наука, исследующая нервную систему, объединяет физиологию, анатомию, молекулярную биологию, биологию развития, цитологию, математическое моделирование и психологию, изучает свойства нейронов и нейронных цепей
Нейромеханика	наука, которая изучает функции мышц, органов чувств, мозга и центральной нервной системы при генерации движений человеком
НКИ	нейрокомпьютерный интерфейс, система, созданная для обмена информацией между мозгом и электронным устройством

Орtez	внешнее медицинское приспособление, предназначенное для изменения структурных и функциональных характеристик нервно-мышечной и скелетной системы
Перовскит	редкий минерал, титанат кальция
Перфузия	метод подведения и пропускания крови, кровезамещающих растворов и биологически активных веществ через сосудистую систему органов и тканей организма
Привод	совокупность устройств, предназначенных для приведения в действие объекта
Протез	искусственное устройство, которое заменяет отсутствующую часть тела, которая может быть потеряна из-за травмы, болезни или врожденного состояния
Пьезоэлектрический	обладающий эффектом электрического заряда, который накапливается в определенных твердых материалах в ответ на приложенное механическое напряжение
Сенсор	устройство, модуль, машина или подсистема, предназначенная для обнаружения событий или изменений в окружающей среде и передачи информации для дальнейшей обработки
Скаффолд	каркас, временная поддержка, которая используется для крепления клеточных структур
Экзоскелет	носимое мобильное устройство, приводимое в действие системой электродвигателей, пневматики, рычагов, гидравлики или комбинацией технологий, позволяющих осуществлять движение конечностей с повышенной мощностью и выносливостью
Эластомеры	полимеры, обладающие высокоэластичными свойствами и вязкостью
ЭМГ	электромиография, способ электродиагностической медицины для оценки и регистрации электрической активности, производимой скелетными мышцами
ЭЭГ	электроэнцефалография, способ электрофизиологического мониторинга для регистрации электрической активности головного мозга
ЦНС	центральная нервная система
In vitro	технология выполнения экспериментов, когда опыты проводятся вне живого организма
In vivo	проведение экспериментов на (или внутри) живой ткани живого организма
R&D	деятельность в сфере исследований и разработок

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения, порядка 15 % мирового населения, около 1 миллиарда человек, имеют стойкие нарушения функций и структур организма, препятствующие физической активности и вовлечению в социальную жизнь, около 110–190 миллионов людей испытывают значительные трудности в повседневной активности [1]. Распространение инвалидности увеличивается в связи со старением населения и быстрым ростом хронических заболеваний, а также совершенствованием методологий, используемых для измерения инвалидности. По оценкам Всемирного банка, глобальный ВВП недополучает около 5–6 % ежегодно вследствие проблем, связанных с инвалидностью [2]. Многие из этих проблем можно решить за счет применения ассистивных или вспомогательных технологий и продуктов – средств для восстановления функций организма, и этому способствуют современные разработки в области биомехатроники.

Ассистивные технологии – это собирательный термин, охватывающий разнообразные средства и услуги. Ассистивные средства предназначены поддерживать на прежнем уровне или повышать функциональные возможности и автономность людей, способствуя их благополучию. В контексте старения мирового населения и роста распространенности неинфекционных заболеваний к 2050 году более двух миллиардов человек будут нуждаться по меньшей мере в одном ассистивном средстве, а многим престарелым будет необходимо два и более таких средств [1].

Родившееся на рубеже XXI века понятие «биомехатроника» относится к междисциплинарному направлению науки, которое объединяет биологические и мехатронные системы. Термин «биомехатроника», ранее «био-мехатроника», вошел в употребление в конце 1990-х годов. Биомехатроника – это довольно широкая область науки, охватывающая все системы, в которых биологические и мехатронные компоненты составляют функционально единое целое [3].

Термин «биомехатроника» стал активнее использоваться в начале 2000-х годов благодаря разработкам группы биомехатроники Массачусетского технологического института (США), которые традиционно ориентированы на восстановление двигательных функций людей с нарушенной подвижностью из-за травм или болезней.

Биомехатроника меняет повседневную жизнь общества и оказывает значительное влияние на сферу здравоохранения, реабилитацию пациентов, помогая инвалидам с ампутированными конечностями восстановить утраченные функции, улучшить

качество жизни. Прогресс биомехатроники связан с развитием нейробиологии и нейромеханики. Ученые стремятся разрабатывать и внедрять технологии, которые приблизят возможность слияния тела человека и машины. Это касается и архитектуры устройств, которые напоминают естественный опорно-двигательный аппарат, и технологии приводов, которые ведут себя как мышцы, и методологии управления, которая опирается на биологические принципы управления движением человека.

Не всегда возможно разграничить, какие устройства следует охарактеризовать как биомехатронные. Типичными примерами биомехатронных устройств являются протезные системы (например, протезы верхних и нижних конечностей), носимые вспомогательные устройства (например, электрические приводимые в действие экзоскелеты, ортезы и т. д.) и искусственные органы и имплантаты (например, кохлеарные имплантаты и т. д.). Большинство из этих устройств используются для восстановления биологических функций человека или для повышения человеческих возможностей [4].

Междисциплинарная природа и влияние, которое биомехатроника оказывает на здравоохранение и общество, делают ее одним из самых значимых направлений инновационных технологий в XXI веке.

1. КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ БИОМЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

1.1. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ БИОМЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Организм человека как физиологическая система подвержен отклонениям от нормы. Отклонения в функционировании, более известные как патологические состояния, могут наблюдаться в отдельных органах или проявляться системно. При определенных патологических состояниях организм, как мультидисциплинарная физиологическая среда, вполне подходит для внедрения биомехатронных систем [5].

Ключевые принципы работы биомехатронных устройств в основном связаны с выполнением таких действий, как манипуляция, локомоция, сенсорные взаимодействия, задачи обработки информации и контроля.

Способность человека манипулировать предметами при выполнении повседневных задач часто затрудняется вследствие травм или нервно-мышечных расстройств. Разработкой соответствующих устройств успешно занимается робототехника.

Специалисты по биомехатронике на протяжении многих лет изучают движения животных и людей, в самых передовых лабораториях основное внимание уделяется локомоциям человека – от вопросов стабилизации походки до уникальных решений для протезных систем и экзоскелетов.

Человеческий организм в физиологических и патологических состояниях можно представить в виде замкнутой системы с массивом входных и выходных портов, через которые происходят энергетические взаимодействия с окружающим миром. Информация о природе взаимодействия реализуется посредством сенсорных датчиков, которые рассматриваются как высокоразвитая система сбора и накопления информации.

Собранные от датчиков данные обеспечивают сложный массив сигналов и с использованием стратегии машинного обучения могут способствовать распознаванию намерений пользователя в реальном времени. Достижения в области нейробиологии – ключевой компонент будущего развития систем контроля и обработки информации [5].

1.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И СЕНСОРЫ

Одной из целей биомехатронных систем является замена отсутствующей функции или части тела. На эти системы возлагаются большие надежды, потому что неповрежденные естественные приводы тела – мышцы – сильны, легки, гибки и тесно интегрированы с нервной системой – биологической системой управления человека. Необходимо отметить, что еще не изобретены искусственные приводы, которые приближаются к возможностям мышц человека.

Приводы можно разделить как использующие макродвижение (электромагнитные, гидравлические и пневматические) и микродвижение (пьезоэлектрические и магнитострикционные и др.) [6].

Но возможности современных биомехатронных приводов, «актюаторов», быстро растут в силу целого ряда факторов. Традиционные технологии приводов, как, например, электрические двигатели, уменьшаются в размерах и весе, так же как и их источники питания. Новые технологии приводов, среди которых материалы с эффектом памяти формы и диэлектрические эластомеры, выходят из исследовательских лабораторий в коммерческое применение. Эти усовершенствования могут обеспечить более тесную интеграцию с человеческим телом для решения широкого спектра задач [4].

Важным элементом биомехатронной системы является определение устройством, что происходит в окружающей среде. Сенсоры являются важнейшими элементами любого биомехатронного устройства, так как они позволяют системам реагировать на внутренние и внешние воздействия, в том числе биологические [7].

В организме нервная система отвечает за координацию физиологических процессов. Сенсорные рецепторы передают информацию нервной системе через широкий диапазон сигналов. Биомехатронные системы стремятся воспроизвести эти структурно-функциональные отношения, однако сложность человеческой нервной системы трудно воспроизвести синтетически. Синтез информации от нескольких датчиков также является достаточно сложной задачей.

Биомехатронные устройства требуют множества действующих сенсоров для локализации препятствий, тактильной обратной связи, взаимодействия с окружающей средой или для своевременной защиты. Человек обладает исключительно сложной системой для восприятия многих видов внешних воздействий и передачи этой информации в центральную нервную систему для обработки.

Сенсоры, используемые в биомехатронике, можно разделить на химические, электрические, оптические, механические и термические. Данные искусственные датчики успешно имитируют многие индивидуальные сенсорные возможности человеческого организма, но слияние сигналов от нескольких датчиков требует создания сложных алгоритмов для их обработки [8].

Будущее современных биомехатронных датчиков и исполнительных механизмов в значительной степени зависит от достижений в сфере материаловедения. Чувствительные материалы, такие как электроактивные полимеры, пьезоэлектрические материалы или сплавы с памятью формы, уже позволили разработать новые приводы и датчики для биомехатроники. Исследуются другие материалы, включая композиты с фазовым переходом, пенные материалы, биоразлагаемые продукты и ткани [4].

Материалы с фазовым переходом могут хранить и высвобождать большое количество энергии, их использование в приводах может обеспечить альтернативу традиционным электромеханическим механизмам. Например, при температурном фазовом переходе происходит быстрое расширение материала и создается значительное механическое усилие. Деформация мягких эластомерных мембран достигается с помощью обратимых фазовых переходов жидкость – пар.

Эффект фазового перехода используется в композитном метаматериале, содержащем полидиметилсилоксан, в работе группы ученых Колумбийского университета Нью-Йорка (США) [9]. Для создания нового типа привода был использован эластомер на основе матрицы и этанол в качестве наполнителя, максимальное зафиксированное при температуре 90° С расширение материала составило 915 %. Когда композит нагревается до температуры перехода жидкость – пар, этанол кипит, приводя к объемному расширению эластомера. Расширение эластомера может быть использовано для создания привода, способного претерпевать большие деформации (Рис. 1).

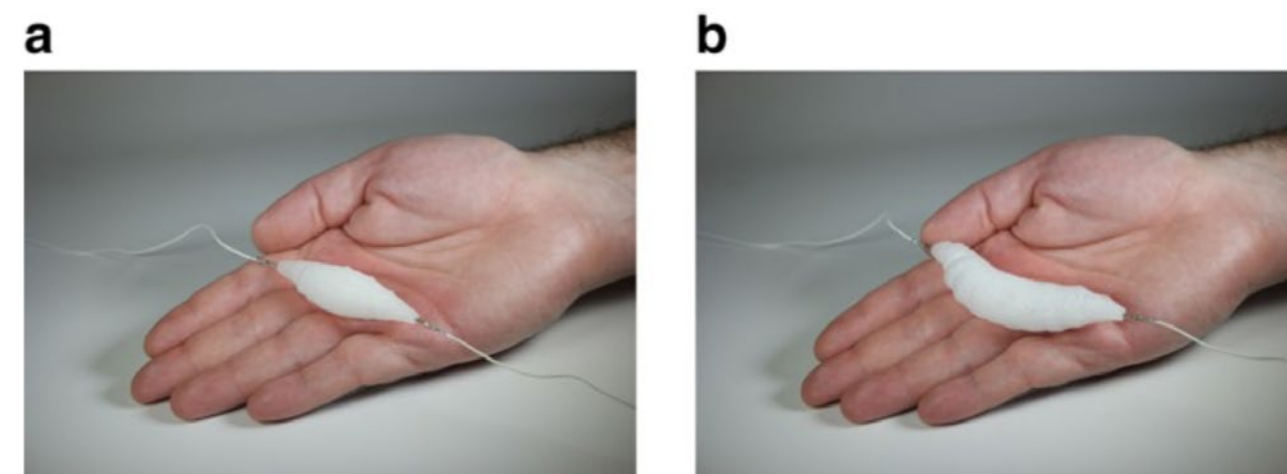


Рис. 1 Пример мягкой искусственной мышцы, которая состоит из этанола, распределенного по твердому силикону эластомерной матрицы: а) мышца в состоянии покоя и б) активная мышца [9].

Эластомерные пены могут быть использованы для создания новых приводов, способных обеспечить перемещение в пространстве, обладающих силой до 20 Ньютонов. Такой типичный привод состоит из вспененного эластомера и непористого уплотнительного слоя [10]. При давлении соединенная пористая сеть приводит

к тому, что привод сгибается, вытягивается или скручивается. Эластомерные пены обеспечивают широкий спектр применения.

Биологически разлагаемый в организме и биосовместимый привод синтезирован в Laboratory of Intelligent Systems (Швейцария) с использованием комбинации желатина, глицерина и воды [11]. Привод отлит в специальную форму с предусмотренными воздушными камерами для пневматического воздействия (Рис. 2). Желатиновые или другие биоразлагаемые приводы могут быть использованы в качестве одноразовых роботов для медицинского применения, например, в диагностических целях.



Рис. 2 Биоразлагаемый привод [11].

Мультимодальная тканевая тактильная кожа синтезирована в работе группы ученых Института технологии Джорджии (США) с использованием комбинации проводящей, изолирующей и резистивной ткани со встроенными термисторами [12]. Кожа способна к восприятию давления, активному и пассивному тепловому восприятию.

Тактильное восприятие, казалось бы, тривиально для человека, но его сложно реализовать в роботизированных системах. Чувство осязания позволяет определить текстуру, форму, твердость или тип материала, помогает при обнаружении скользящих предметов. Перчатка из проводящей резины для получения тактильной информации при захвате объекта, и информация на перчатке, разработанной специалистами Стенфордского института (США), показана на рис. 3 [13].

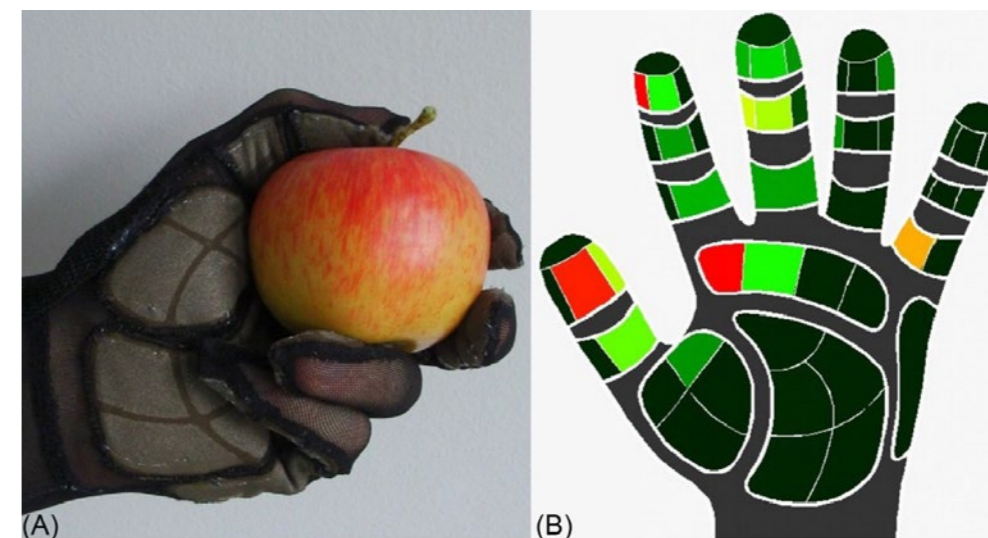


Рис. 3 Перчатка, воспринимающая тактильную информацию [13].

2. БИОМЕХАТРОННЫЕ АССИСТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА

2.1. БИОНИЧЕСКИЕ ТКАНИ, ИСКУССТВЕННЫЕ ОРГАНЫ И ИМПЛАНТАТЫ

Попытки заменить дисфункциональные или отсутствующие части тела инженерными устройствами осуществляются человеком на протяжении 3000–4000 лет. Самые древние артефакты в виде зубных протезов и искусственных пальцев ног датируются 2500 и 1500 годами до н. э. В настоящее время не только материаловедение, электротехническая и электронная техника, инженерная

механика, но также нанотехнологии и тканевая инженерия применяются для проектирования искусственных органов.

Группой ученых из Университета Колорадо в Боулдере (США) разработана электронная кожа (e-skin) [14]. Устройство выполнено в виде тонкого полупрозрачного материала, обладающего способностью имитировать функции и свойства биологической кожи (Рис. 4).

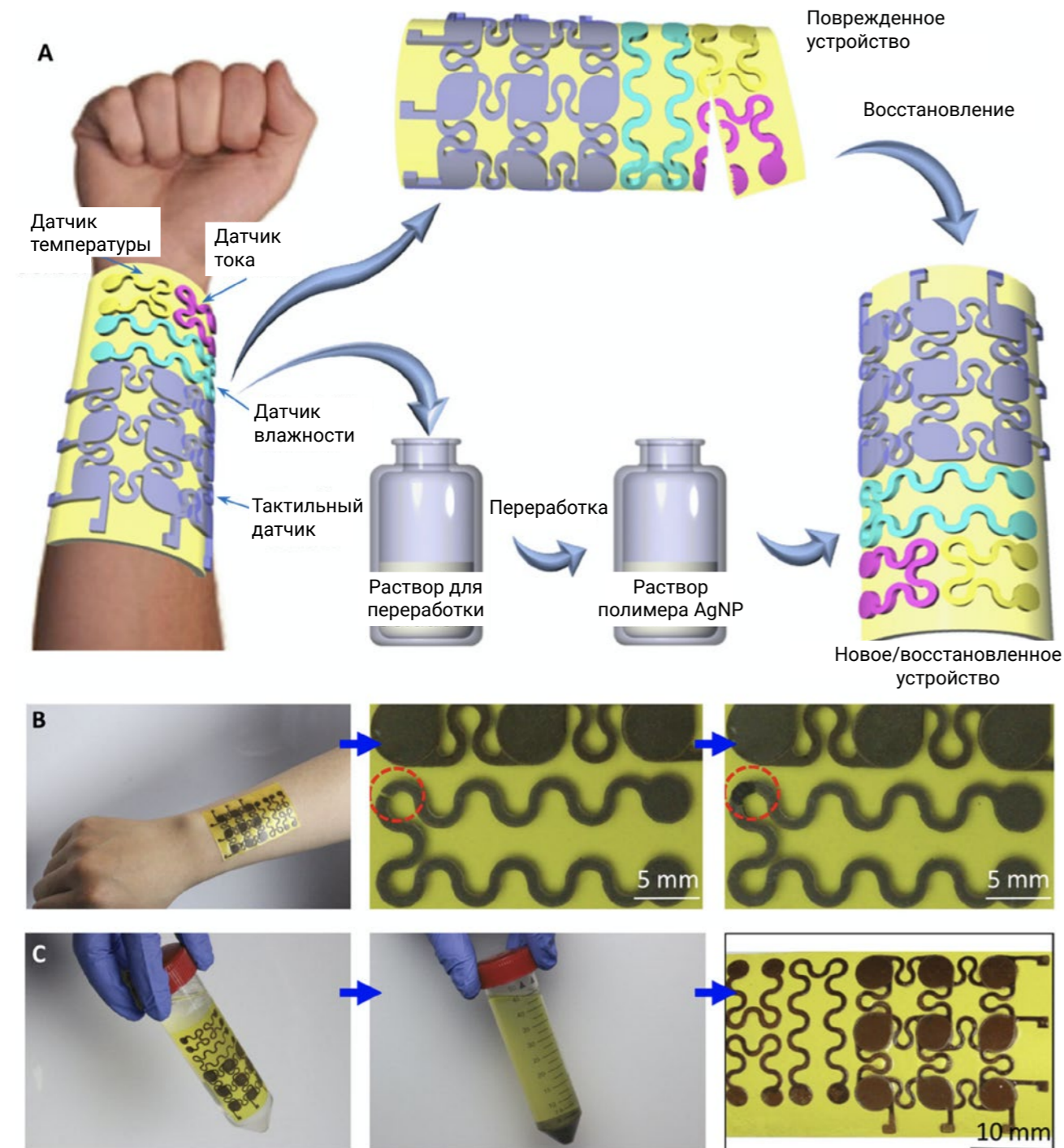


Рис. 4 Электронная кожа (e-skin) и ее компоненты [14].

Изобретение основано на материале полиэтиленимин или полиимин (polyimine), в который встроены сенсоры, оценивающие влажность, температуру, давление. Датчики содержат частицы серебра для обеспечения механической прочности и электропроводности. В случае повреждения устройства для восстановления химических связей между датчиками необходимо нанести полиимин в место разрыва. При температуре 20–30 °С материал регенерируется за 30 минут, и за 10 минут при нагреве до 80 °С и повышении давления до 8,5 кПа. Если электронные схемы испорчены, материал можно растворить в этаноле.

Пластичность позволяет электронной коже соответствовать геометрии объекта, облегчая выполнение стабильных захватов. Представленная электронная кожа – не просто сенсорная система, это интеллектуальная бионическая ткань, которая может стать одним из ключевых элементов устройств биомехатроники (например, биоинспирированных роботов, усовершенствованных протезов, вспомогательных устройств и т. д.).

Одним из наиболее перспективных направлений является биопечать искусственных органов. Группа ученых из Университета Принстона и Университета Джонса Хопкинса (США) использовали аддитивное производство биологических клеток со структурными и наноэлектронными элементами для создания 3D-напечатанного бионического уха, которое обладает слуховым восприятием (Рис. 5) [15].



Рис. 5 3D-напечатанное бионическое ухо [15].

Подход предлагает сложное слияние биологических функций и наноэлектронных возможностей с помощью 3D-печати.

Биологический глаз – один из самых сложных органов, уже в течение десятилетий ученые пытаются воспроизвести функции этого органа с помощью различных новых

технологий. Существующие протезные системы не выполняют эти функции, они обладают низким разрешением и 2D-изображением.

Международная команда исследователей из Гонконгского университета науки и техники и Калифорнийского университета в Беркли (США) преодолела эти недостатки, впервые создав биомиметический протез глаза – «электрохимический глаз» (EC-Eye) с использованием нанопроволочного массива, который создает полусферическую искусственную сетчатку, т. е. датчик 3D-изображения [16].

EC-Eye, по мнению разработчиков, действительно может обеспечить более острое зрение, чем человеческий глаз, а также некоторые дополнительные функции, например, способность обнаруживать инфракрасное излучение в темноте.

Ключевой особенностью нового искусственного глаза является нанопроволочная матрица, полученная из перовскитовых элементов, которые могут имитировать биологические фоторецепторы сетчатки. Эти нанопроволоки соединены с пучком жидкометаллических проводов – «искусственных нервов», направляющих световые сигналы на экран компьютера, который демонстрирует, что массив нанопроволок «видит». Есть предположения, что подобные нанопроволочные сетчатки могут быть непосредственно имплантированы пациентам с нарушениями зрения и подсоединены к зрительным нервам.

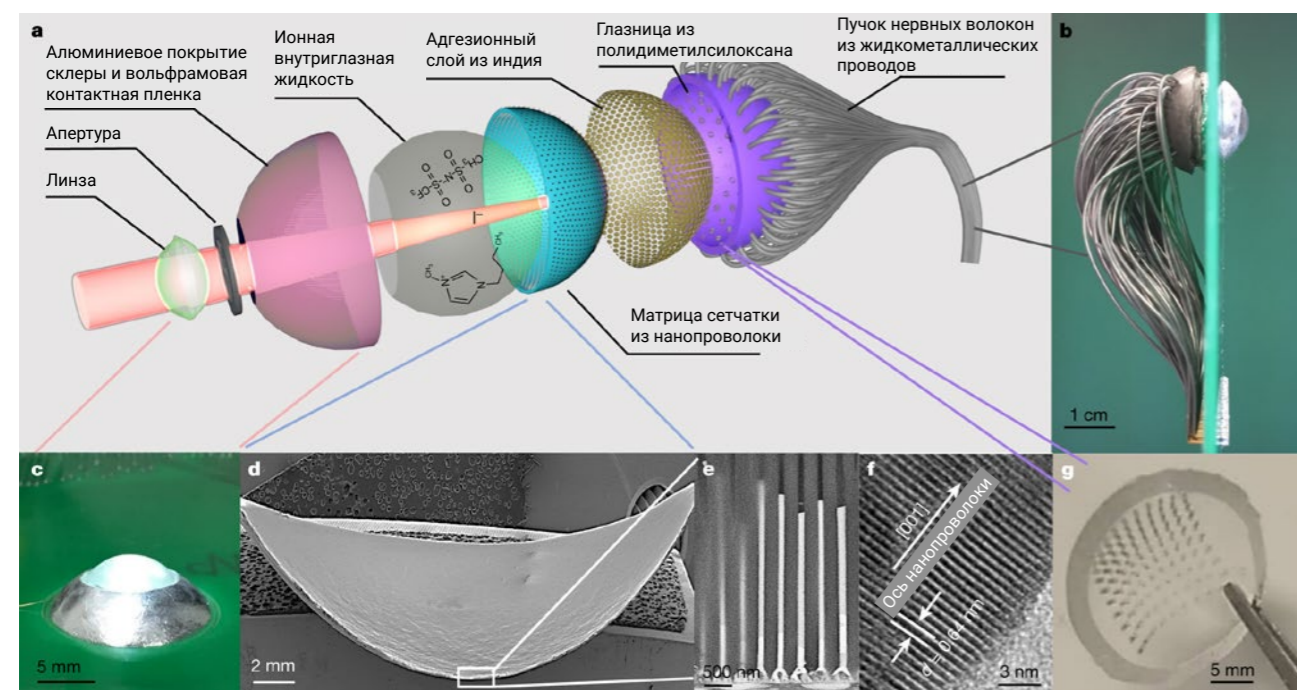


Рис. 6 Биомиметический протез глаза [16].

Другие примеры будущих био-искусственных органов разработаны с помощью автоматизированной струйной 3D-тканевой печати, это аутологичные, биоискусственные конечности, созданные на основе клеток, полученных от пациента (Рис. 7).

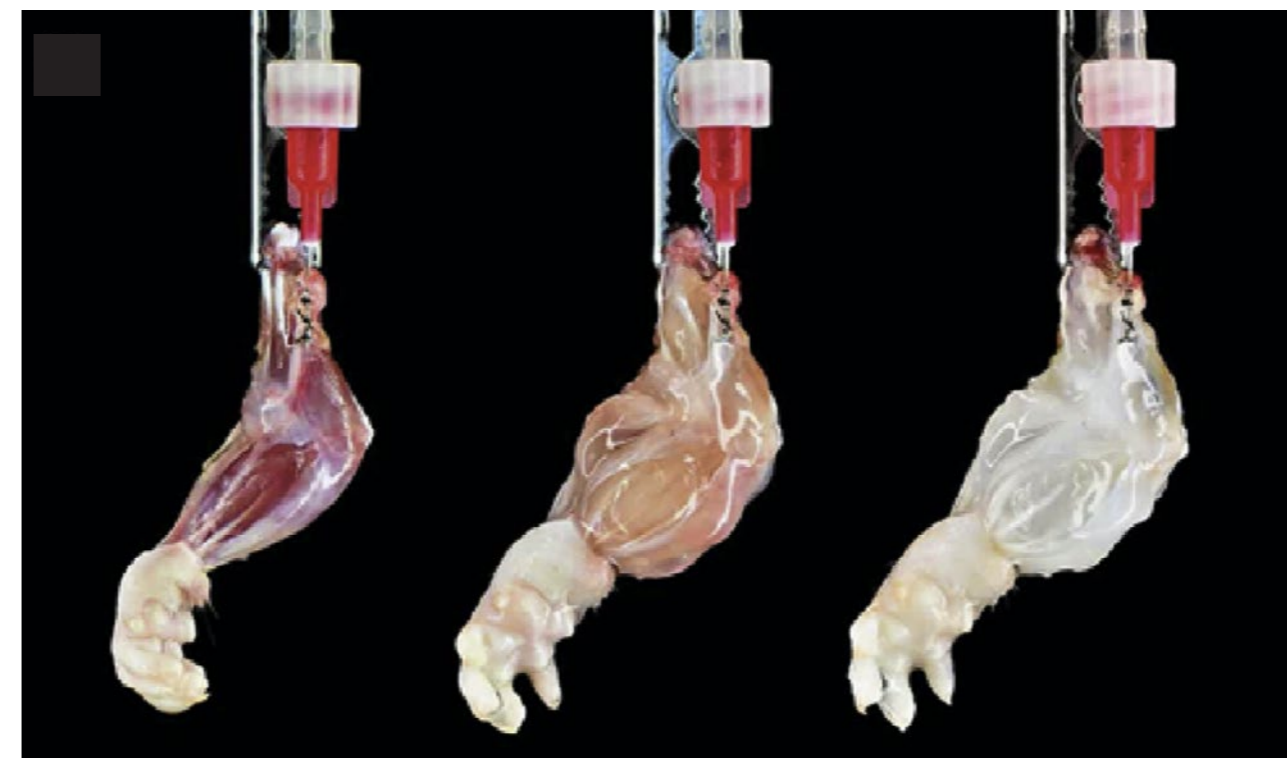


Рис. 7 Пример биопротеза конечности, созданного на основе полученных нативных клеток [17].

Аутологичный биоискусственный трансплантат на основе полученных от пациента клеток может быть произведен индивидуально и не требует иммуносупрессии после трансплантации. Чтобы создать такой трансплантат, группа ученых из Главного госпиталя Массачусетса и Гарвардской медицинской школы (США) децеллюлизовали предплечья крыс и приматов путем детергентной перфузии и получили ацеллюлярные каркасы с сохраненной композитной архитектурой [17]. Затем мышцы и сосуды были заселены клетками соответствующих фенотипов, которые созревали *in vitro* в перфузионном биореакторе под воздействием электростимуляции. После подтверждения формирования композитной ткани полученные биокомпозитные трансплантаты пересаживали *in vivo*.

Прогресс развития 3D-печати в медицине может быть описан четырьмя этапами, как показано на рис. 8 [18]. В первом этапе 3D-печать применялась для изучения возможностей напечатанных фрагментов органов или тканей *in vitro*. На втором этапе началась печать биосовместимых тканей с использованием небиodeградируемого материала для применения *in vivo*. На третьем этапе трансплантаты стали изготавливаться с использованием биоразлагаемого материала с перспективой регенерации собственных тканей. Четвертый этап включает в себя индивидуальную 3D-печать органов и тканей с использованием внеклеточного матрикса, белка и клеток самого пациента в качестве печатного материала.

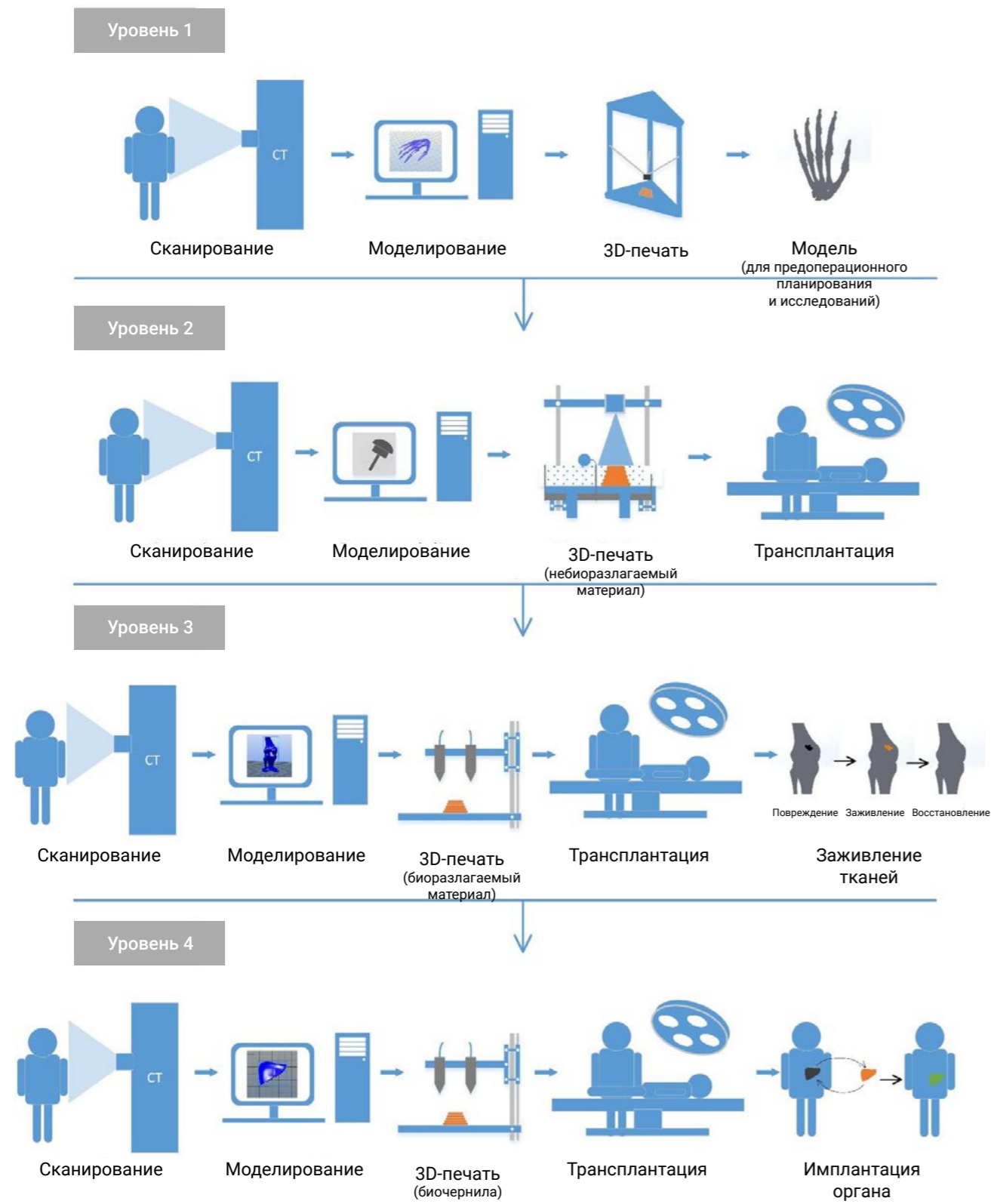


Рис. 8 Уровни развития 3D-печати в медицине [18].

2.2. ПРОТЕЗНЫЕ УСТРОЙСТВА

Как уже было отмечено, последние достижения в области материаловедения и технологий готовят революцию в разработке новых, сложных датчиков и приводов для биомехатроники. Но также новые материалы влияют на саму конструкцию различных биомехатронных устройств (например, протезов и вспомогательных устройств).

Ученые из Гарвардского и Йельского университетов США предложили новое протезное устройство, в нем 3D-печатные материалы сочетаются с эластомерными структурами, используемыми в роли сухожилий и связок [19]. Результаты экспериментального исследования предложенного протеза выглядят весьма перспективными и демонстрируют повышенную надежность, адаптивность и долговечность протеза. Рука-протез использует меньшее количество приводов для большего числа возможных манипуляций. Один привод обеспечивает 8 степеней свободы (Рис. 9).

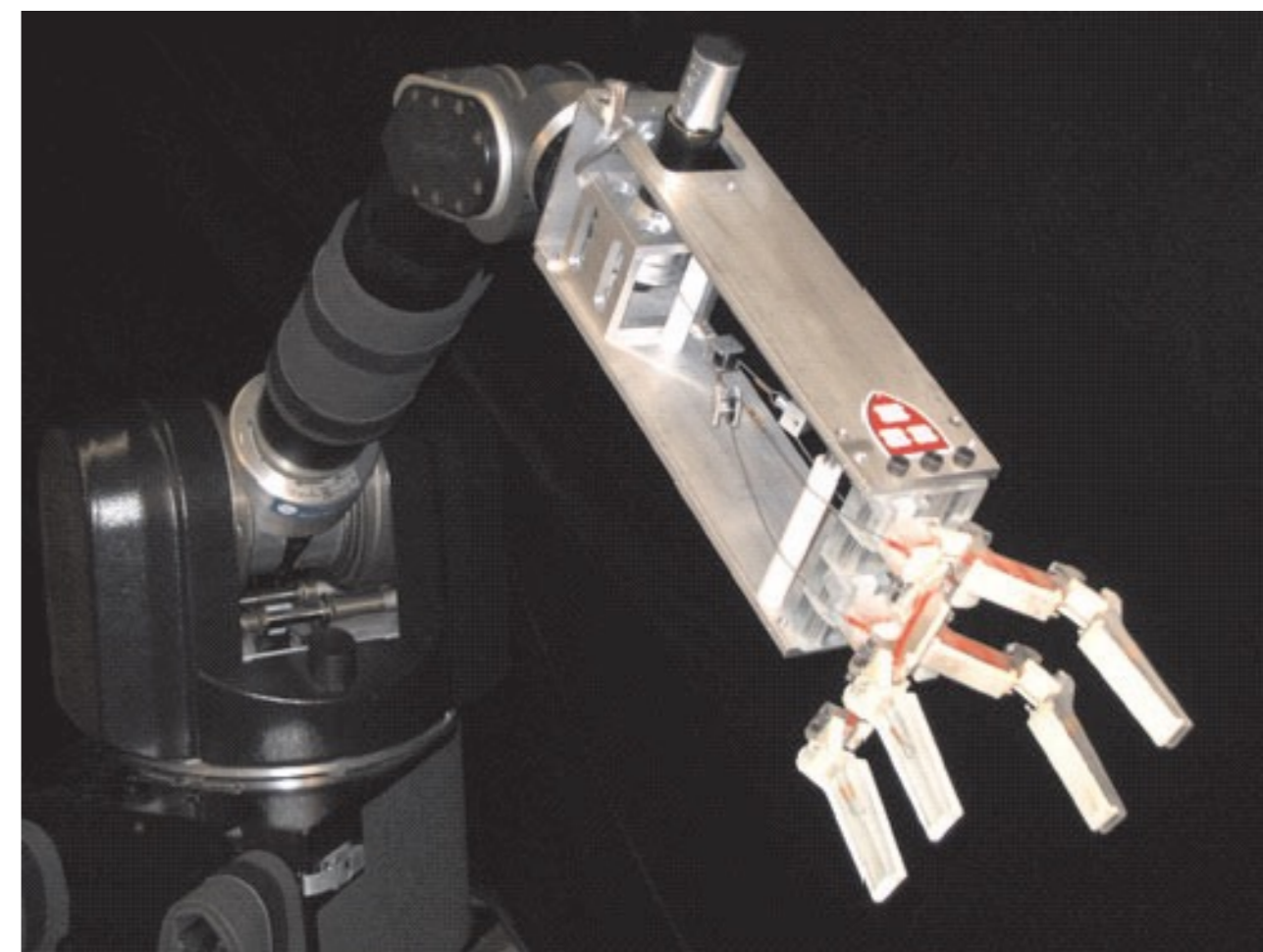


Рис. 9 Прототип протеза руки с использованием эластомерных материалов [19]

Другие перспективные примеры сосредоточены в области исследования композитных материалов, которые используются в современной ортопедической медицине для протезных устройств и обладают превосходными характеристиками по прочности, массе, биосовместимости, а также материалов, которые позволяют в режиме онлайн настраивать некоторые механические свойства устройств (например, жесткость). Что касается переменной жесткости, то учеными из Университета Мичигана (США) предложен протез голеностопного сустава, обладающий способностью быстро адаптировать жесткость лодыжки в процессе движения [20].

Еще одной тенденцией в развитии протезирования является разработка высокобиомиметических устройств, которые воспроизводят не только функциональные возможности, но и внешний вид – например, антропоморфная рука.

Группой ученых из Политехнического института Ворчестера (США) разработан высокоточный, недорогой, легкий биомиметический протез, который воспроизводит человеческую форму руки на основе 3D-печатных костей и сухожилий и связок, изготовленных с помощью лазерной резки [21].

Протез руки WPI – это высокоточное биомиметическое устройство, приводимое в действие девятью шаговыми двигателями, упакованными в корпус «предплечья» стоимостью менее чем 350 долларов США. Протез имеет 18 механических степеней свободы, длину 38 см и весит 2,2 кг. Намерение пользователя расшифровывается по сигналам ЭЭГ (электроэнцефалографии) и ЭМГ (электромиографии), полученным датчиками Neugosky и Muoware соответственно. Три разных паттерна ЭЭГ вызывают действия щипка, зацепления или нажатия пальцем. Сигналы ЭМГ используются для более тонкого контроля, например, силы хвата. Пилотное тестовое исследование на трех испытуемых показало, что эффективность приведения в действие руки с помощью ЭМГ составляет 80 %, ЭЭГ – 68 %.

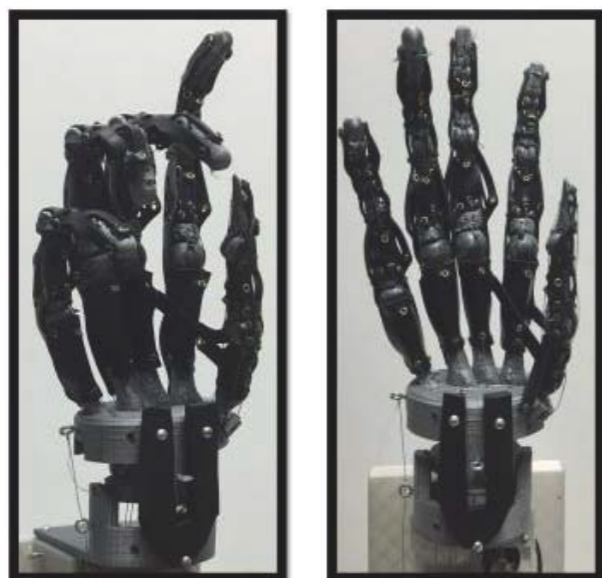


Рис. 10 Биомиметический протез руки [21].

Еще один пример высокобиомиметического протеза, который может быть легко реплицирован с помощью готовых материалов и доступных технологий производства «open-source», – протез OpenBionics hand (Рис. 11), который также основан на сгибаемых суставах и использует селективную блокировку дифференциального механизма, в результате 144 хватательных паттерна и жеста выполняются одним приводом [22]. Устройство разработано группой ученых из Национального технического университета Афин (Греция), Йельского и Корнеллского университетов (США).

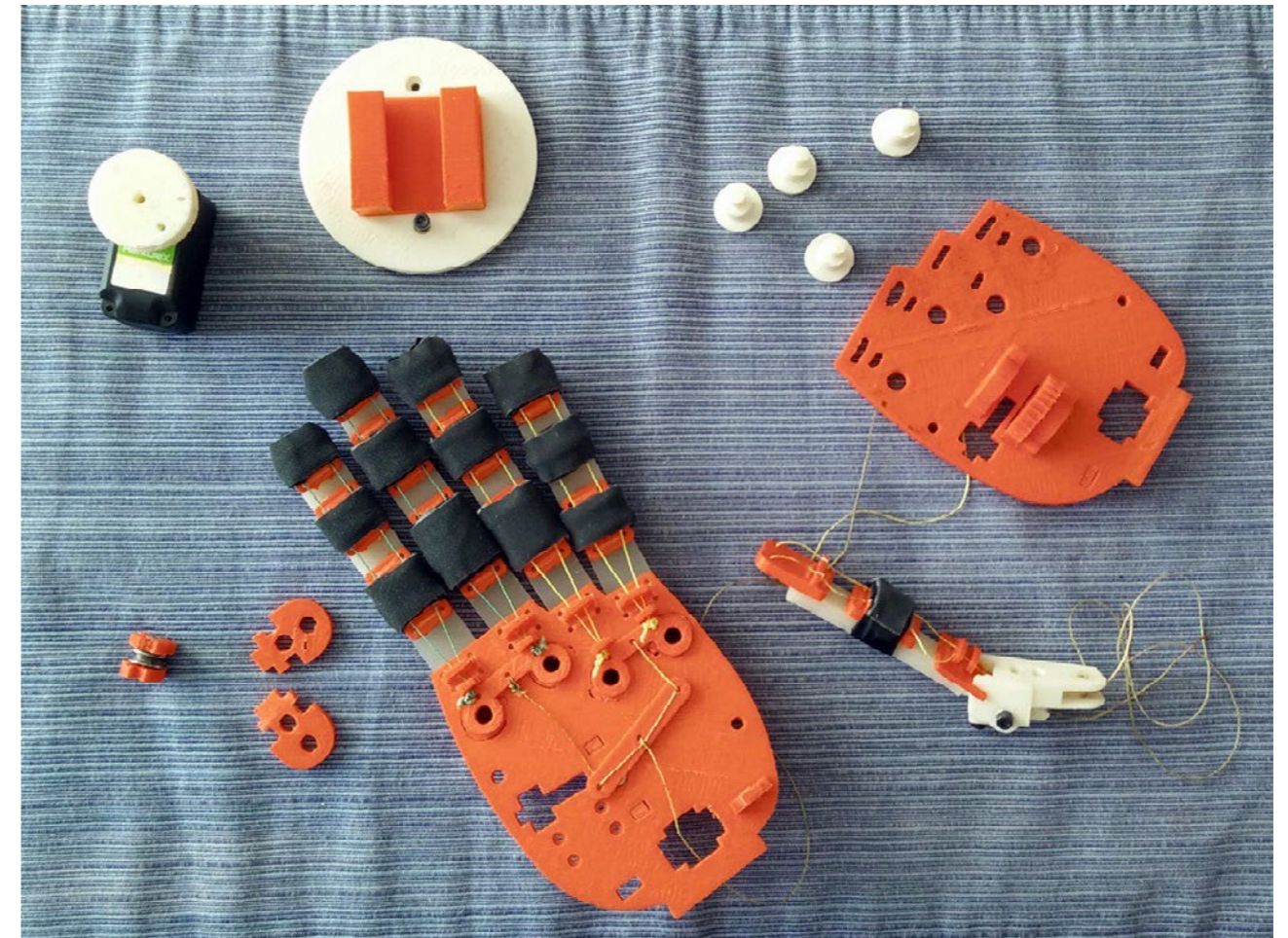


Рис. 11 Протез OpenBionics hand [22].

Модульный протез руки Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Хопкинса (США) (Рис. 12) способен выполнять почти все движения человеческой руки и кисти [23]. Он имеет более чем 100 датчиков в руке и предплечье и, вероятно, является самым сложным в мире протезом верхней конечности. Его вес составляет 4,8 кг, протез включает в себя: аккумулятор, плечо с 3 степенями свободы, локоть с функцией разгибания, запястье с 3 степенями свободы и руку с 10 суставами.

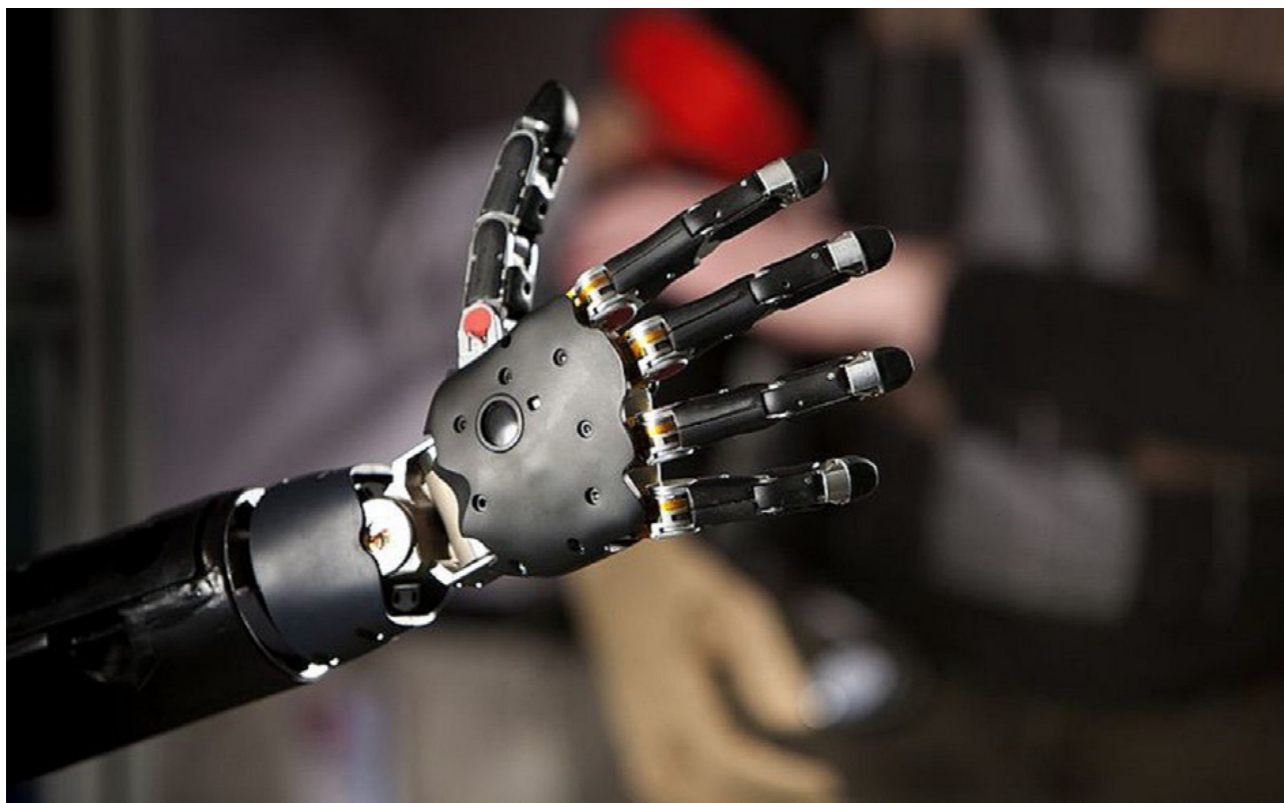


Рис. 12 Модульный протез руки [23].

Усовершенствованный роботизированный протез I-Limb был представлен в 2007 году шотландской компанией Touch Bionics [24]. Эта роботизированная рука способна совершать различные уникальные положения захвата, которые позволяют пользователю сбалансировать мощность и точность по мере необходимости. Вытянув только указательный палец, пользователь может печатать на клавиатуре или нажимать кнопки. Также он может сжать ключ или тарелку, вращая большой палец, чтобы сомкнуть его с указательным. Протез способен останавливаться при достижении достаточного сцепления, позволяя сжимать хрупкие предметы, например пенопластовую чашку, не раздавливая. I-Limb предлагает пользователю индивидуальное управление пальцами на основе ЭМГ, что позволяет выполнять сложные команды (Рис. 13).

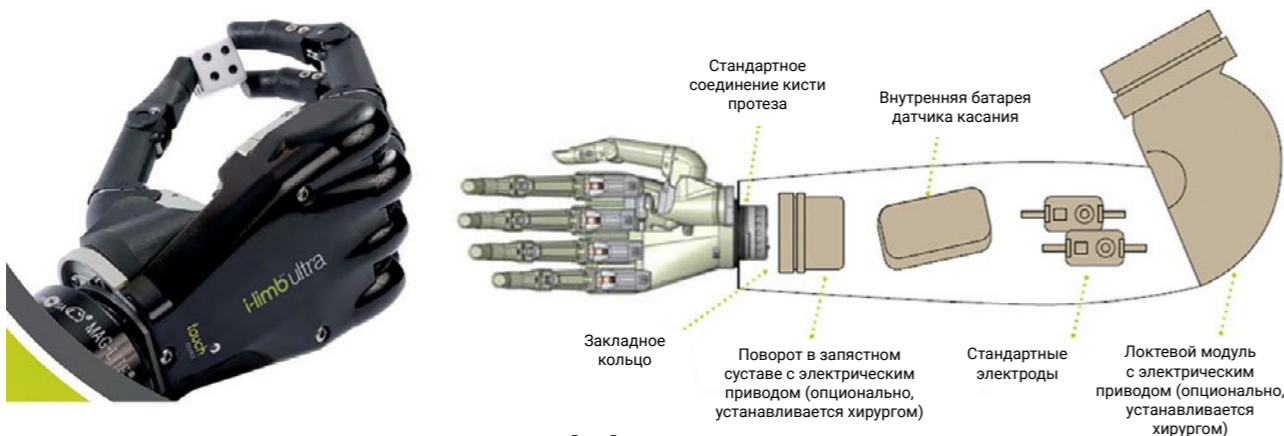


Рис. 13 Роботизированный протез I-limb [24].

На сегодняшний день протез Michelangelo компании Ottobock является одним из самых популярных и коммерчески доступных роботизированных протезов руки [25]. Эта многосуставная система «кисть-запястье», использующая стандартное миоэлектрическое управление (с использованием двух поверхностных ЭМГ-электродов), может создать семь конфигураций захвата, а также оппозицию большого пальца, чтобы выполнить силовой захват и тройные щипковые захваты (большим, указательным и средним пальцами) (Рис. 14).

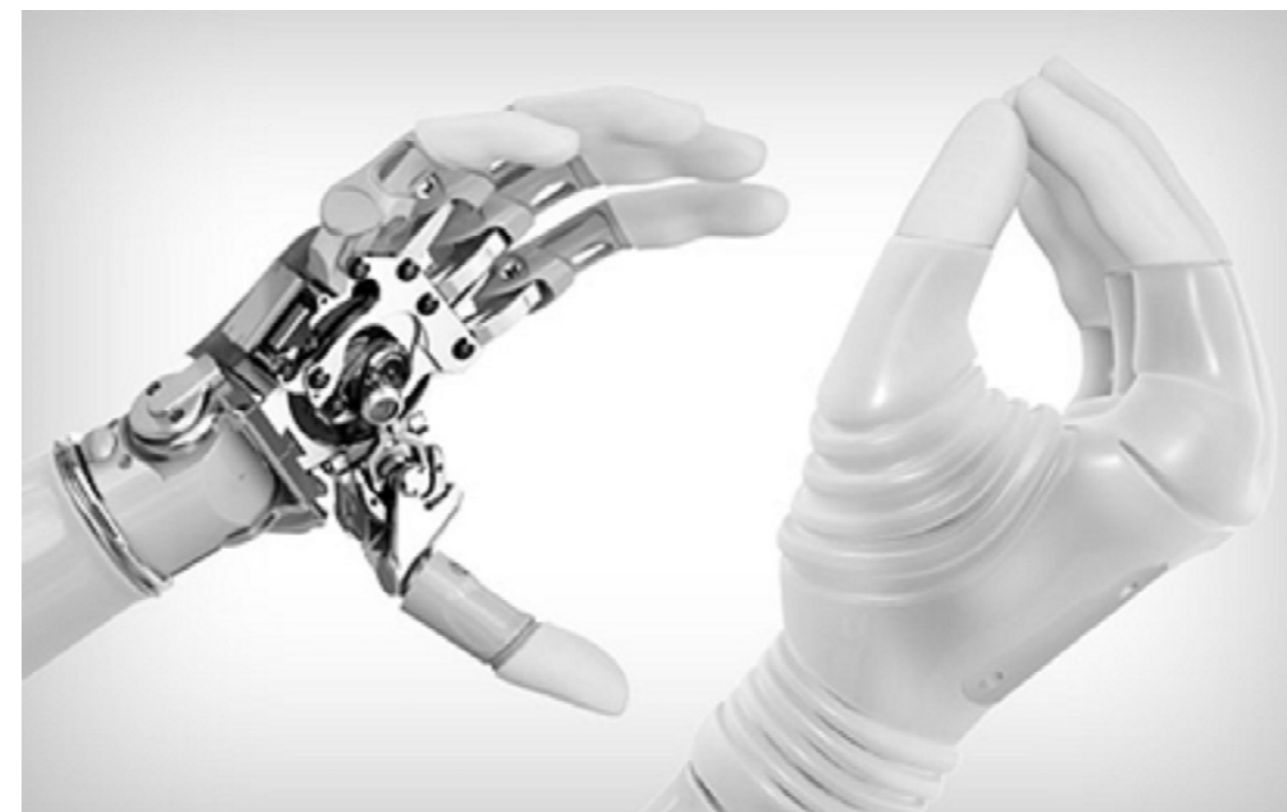


Рис. 14 Протез Michelangelo [25].

Современное состояние техники протезирования верхних конечностей отражает протез с множеством степеней свободы Luke Arm компании Mobius Bionics (США) [26]. На разработку устройства ушло 15 лет, в нем используется технология стимуляции периферических нервов. Электроды прикрепляются к нервам в руке над местом ампутации и к протезу. Управление протезом требует некоторого обучения, так как у людей разная нервная активность, но постепенно программное обеспечение управления протезом адаптируется к нейронным сигналам пользователя, и базовая ловкость восстанавливается. Рука имеет 100 микроэлектродов, которые соединены с нервами в верхней части руки, а также с внешним компьютером (Рис. 15).

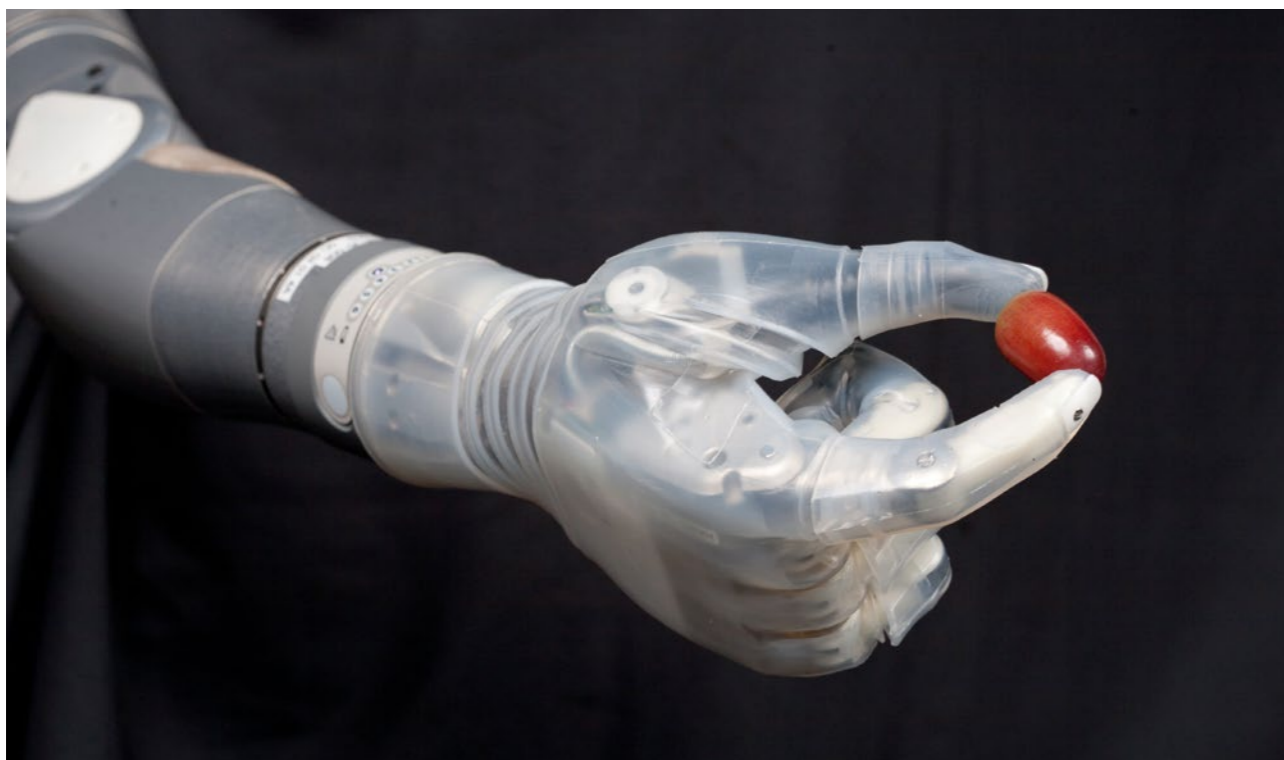


Рис. 15 Протез Luke Arm [26].

Первостепенной целью создания протезов нижних конечностей является максимальное возвращение человеку с ампутированными конечностями двигательных возможностей и свободы передвижения.

Все протезы выше уровня голеностопа включают в себя компоненты стопы и лодыжки. Если ампутация проведена выше колена, добавляются устройства, заменяющие колено. Существуют пассивные, полуактивные и активные устройства, которые классифицируются в зависимости от использования мехатронных компонентов, а также силы/крутящего момента для локомоции [27]. На рисунке 16 представлены современные системы, доступные на рынке.

Пассивные протезные колени, такие как Ossur Mauch SNS или Ottobock 3R80, функционируют на основе механических связей и гидравлики для обеспечения демпфирующих характеристик. Эти пассивные устройства оптимизированы под определенную скорость и походку. Полуактивные протезы коленей Ottobock C-Leg, Freedom Innovations Plie 3, Blatchford/endolite Orion отличаются более современным микропроцессорным управлением и могут адаптировать свои механические свойства через приводы. Например, C-Leg изменяет жесткость сустава и демпфирование путем открытия гидравлического клапана. Среди подобных современных коммерческих продуктов только колено Ossur Power Knee способно обеспечить дополнительную силу локомоции, и, таким образом, классифицируется как активный протез коленного сустава [27].



Рис. 16 Современные протезы нижних конечностей [27].

Пассивные протезы ног обычно основаны на углеродных пружинах, которые накапливают энергию во время контакта с землей и высвобождают во время отталкивания. Полуактивные устройства, такие как Ossur ProprioFoot, Ottobock Triton, Freedom Innovations Kinnex или Blatchford/Endolite elan, используют приводы для обеспечения дорожного просвета во время фазы проноса ноги. На рынке существует только одно активное устройство лодыжки, а именно Empower Ottobock, основанное на результатах исследований профессора Хью Герра из Группы биомехатроники Массачусетского технологического института (США).

2.3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

В отличие от протезных технологий, которые полностью заменяют конечности, цель вспомогательных устройств – помочь человеку в ходе реабилитационного лечения, а также в увеличении функциональных возможностей конечностей [28].

Группа ученых из Университета Сеула (Республика Корея) разработала EgoGlove Poly – мягкий носимый экзоскелет для рук на основе полимера, который позволяет людям, утратившим некоторые функции пальцев, восстановить их, в частности захватывать разнообразные предметы в повседневной жизни [29]. EgoGlove Poly сделана из силикона, следовательно, она водонепроницаемая. Устройство

поддерживает три пальца: указательный, средний и большой. ExoGlove Poly может быть адаптирована к различным размерам и формам руки благодаря свойствам силикона. Конструкция с сухожильным приводом обладает косвенной передачей, что позволяет располагать двигатель, аккумулятор и другие компоненты на расстоянии, облегчая использование.

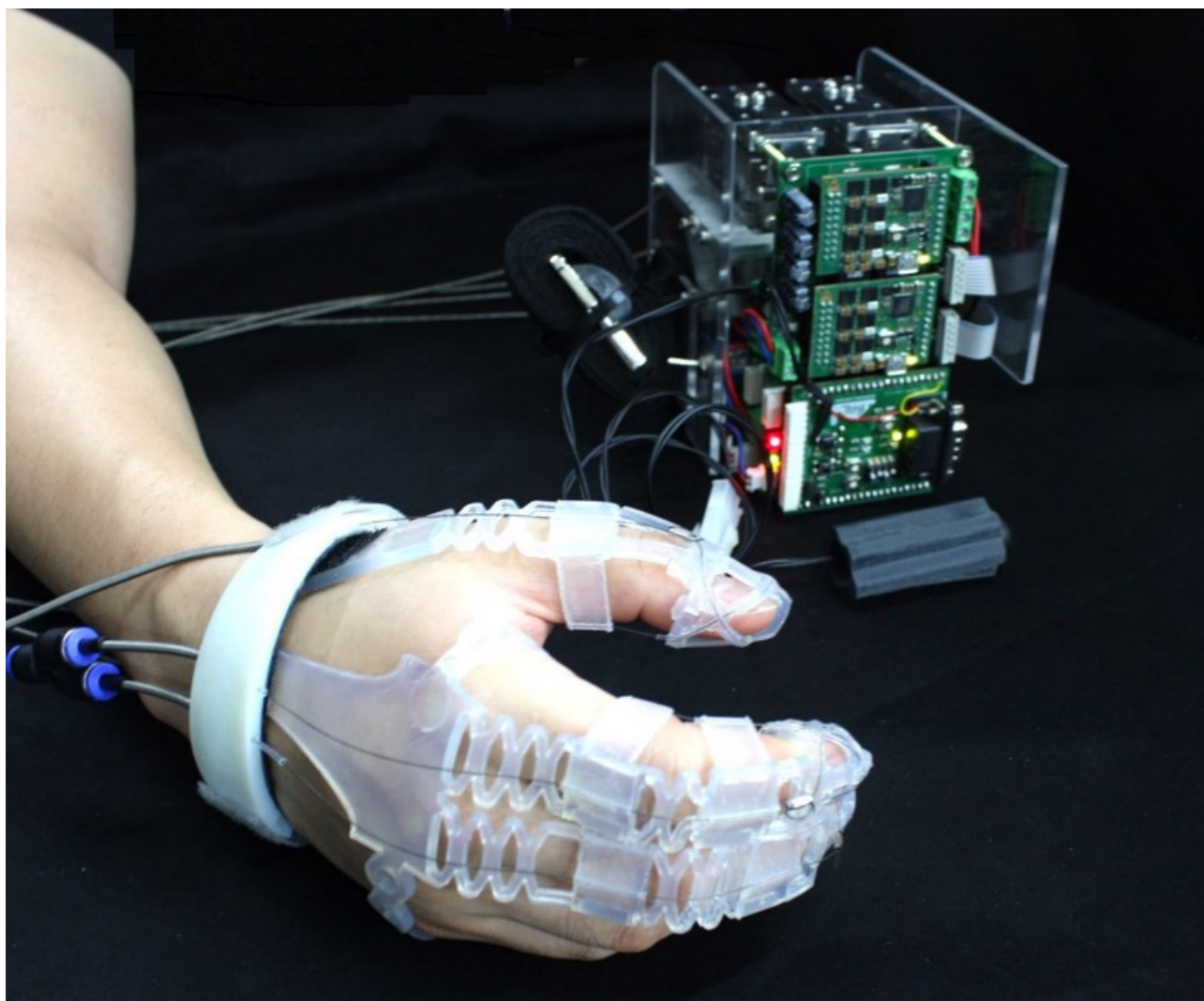


Рис. 17 Экзоскелет ExoGlove Poly [29].

Одним из наиболее перспективных направлений в области вспомогательных устройств является разработка нетрадиционных роботизированных инвалидных колясок, которые также в состоянии помогать пользователю вставать с кровати, садиться на стул, избегать препятствий и даже подниматься по лестнице. Такие инвалидные коляски действуют по принципу экзоскелета, при этом границы между двумя этими типами устройств в последнее время начинают стираться. Роботизированная инвалидная коляска iBOT была разработана в партнерстве компаниями DEKA и Johnson and Johnson's Independence Technology (США) [30, 31] (Рис. 18).



Рис. 18 Роботизированная коляска iBot [30, 31].

Колеса iBOT вращаются вверх и друг над другом, чтобы подняться и спуститься по лестнице (или на/с уличного бордюра). Устройство использует гироскопы, чтобы определить и настроить центр тяжести человека. iBOT также поможет пользователю дотянуться, например, до верхней полки на кухне, приняв вертикальное положение. В мае 2016 года компания Toyota (Япония) в партнерстве с DEKA приступила к разработке и запуску следующего поколения iBOT.

В 2017 году компания Cyberdyne Inc. (Япония) объявила о коммерциализации поддерживающего поясного устройства HAL для поддержания и улучшения ослабленных функций нижней части тела [32]. Пояс использует сигналы ЭМГ, чтобы распознать намерения пользователя и обеспечить вспомогательные крутящие моменты бедра, уменьшить нагрузку на нижнюю часть спины. Вес устройства – 3,1 кг, включая литий-полимерную батарею. Датчики ЭМГ размещаются либо в виде отдельных пластырей в зоне поясничного отдела позвоночника, либо встроены внутри пояса. Пояс рассчитан на работу в течение 3 часов без подзарядки. Уровень поддержки можно регулировать двумя кнопками (Рис. 19).



Рис. 19 Пояс HAL компании Cyberdyne.

Ранее в 2016 году компания Cyberdyne Inc выпустила водонепроницаемый, с приводом бедра поясничный поддерживающий пояс СВ02, предназначенный для медицинских работников, например, для перемещения и поднятия пациентов с меньшими усилиями [33].

В 2015 году Компания Honda Motor Co. (Япония) вывела на рынок устройство Honda Walking Assist Device [34]. Это вспомогательное устройство, используемое при обучении утраченным навыкам ходьбы. Устройство весом 2,7 кг (включая батарею) обеспечивает очень малый крутящий момент 4 нм, что переводится всего в 0,07 Нм/кг нормального крутящего момента бедра (для человека весом 60 кг) (Рис. 20).

Устройство может быть использовано для облегчения ходьбы, даже в достаточно активном режиме.

Проведенное в Японии исследование, в котором приняли участие 14 пожилых людей (средний возраст составил 78 лет), выявило, что после 3 месяцев использования устройства показатели ходьбы без вспомогательного устройства заметно улучшились: длина шага увеличилась более чем на 7 %, а скорость – более чем на 15 %.



Рис. 20 Устройство Honda Walking Assist Device [34].

В 2019 году компания Samsung (Республика Корея) представила GAITS (Gait enhancing and motivating system) – линейку носимых устройств для поддержки бедра, колена, ступни [35]. Прототипом для данной линейки стал Gems-H – помощник для ходьбы, предназначенный для коррекции осанки, обеспечения стабильности, увеличения темпа ходьбы и устойчивости в процессе реабилитации после травм (Рис. 21).

Как вспомогательная технология, разработки Samsung помогают решить проблемы маломобильности и улучшить качество жизни пользователей. Однако носимый аппарат не сможет помочь в экстремальной ситуации – при полном параличе.



Рис. 21 Устройства GAITS компании Samsung.

Разработанный компанией Muoto (США) экзоскелет верхних конечностей может быть классифицирован как вспомогательное устройство и средство реабилитации [36] (Рис. 22). Он использует поверхностную электромиографию для обеспечения движений пальцев, запястья и локтевого сустава. Устройство специально разработано для пациентов с интактными нервными сигналами к верхней конечности при отсутствии адекватного контроля или силы, как правило, в результате инсульта, спинномозговых травм, рассеянного склероза.



Рис. 22 Экзоскелет компании Muoto.

Для пациентов с более высокими функциональными возможностями экзоскелеты компаний ReWalk [37] и Ekso Bionic [38] (Рис. 23) позволяют пациентам полноценно ходить по земле. Эти устройства подходят для использования в клинике или дома. Пациенты носят на нижних конечностях экзоскелет с приводимыми в действие суставами, которые помогают при ходьбе. Однако пациентам необходим умеренный контроль равновесия или умение пользоваться костылями. ReWalk предлагает различные режимы работы двигателей для обеспечения стабильности в положении стоя, при ходьбе (обеспечение крутящего момента в тазобедренном и коленном суставах в сагиттальной плоскости) или подъеме из сидячего положения (обеспечивая крутящий момент для ускорения тела против силы тяжести).



Рис. 23 Экзоскелеты ReWalk [37] и Ekso Bionic [38].

Исследователи Института Висса из Гарвардского университета (США) предлагают новую парадигму экзоскелетов, выполненных в форме мягкой одежды. Костюм из специально разработанной ткани значительно легче экзоскелета, он не содержит жесткой конструкции, обеспечивает минимальные ограничения движений владельца и позволяет избежать проблем, связанных с несоосностью суставов (Рис. 24) [39, 40].

Институт Висса объявил о положительных результатах испытаний мягкого экзоскелета для помощи при ходьбе пациентам после инсульта и сотрудничает с компанией ReWalk Robotics (США), чтобы ускорить разработку легких, носимых мягких экзоскелетов. Вспомогательные экзоскелеты предназначены пациентам после инсульта и страдающим рассеянным склерозом.

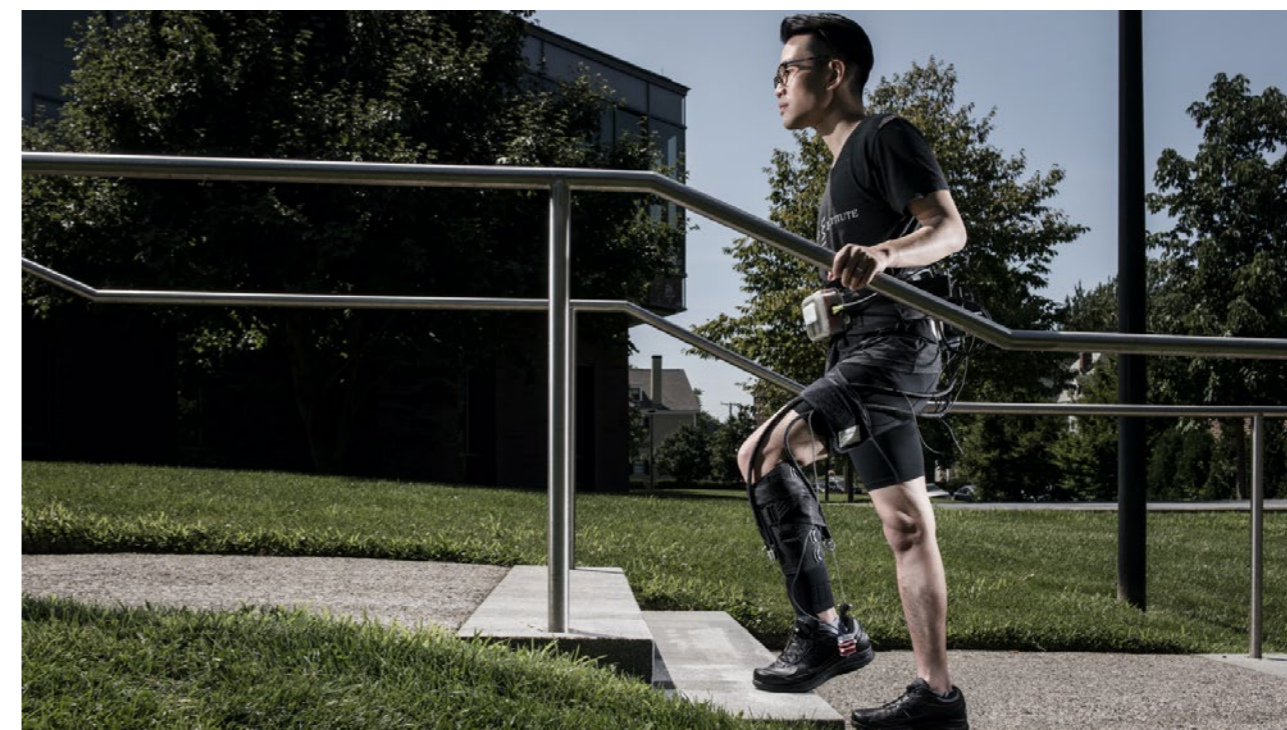


Рис. 24 Мягкий экзоскелет [39, 40].

Реабилитация – одна из наиболее динамично развивающихся сфер применения экзоскелетов, предназначенных для помощи парализованным пациентам. Эти устройства должны быть способны реагировать на любую команду пациента. Системы нейрокомпьютерного интерфейса обещают улучшить применение экзоскелетов для сенсомоторной и нейромоторной реабилитации больных и обеспечить интеграцию пользовательских команд непосредственно из мозга. Биологические приводы мышц человеческого тела можно использовать вместо внешних приводов. С этой целью проводится контролируемая функциональная электростимуляция мышц. Такое гибридное управление обладает значительным потенциалом для реабилитации навыков ходьбы. Несмотря на десятилетия исследований, связанных с многофункциональным миоэлектрическим управлением, многое еще предстоит сделать, прежде чем оно будет интегрировано в современные коммерческие экзоскелеты.

В связи с увеличением продолжительности жизни во многих странах количество пожилых людей и инвалидов, нуждающихся в постоянной помощи, может вскоре превзойти число их потенциальных опекунов.

Одним из перспективных решений являются роботизированные системы, которые могли бы помочь нуждающимся на дому, в клиниках или домах престарелых.

Система Robear, разработанная компанией Riken (Япония), является «ко-роботом» (collaborative robot), который, например, поможет человеку подняться с дивана и сесть в инвалидное кресло [41]. Ко-робот включает в себя приводные блоки с очень низким передаточным отношением, что позволяет суставам двигаться очень быстро, точно

и мягко. Помимо датчиков крутящего момента, Robear имеет тактильные датчики, полностью изготовленные из резины, которые обеспечивают мягкие движения и гарантируют, что робот может выполнять энергоемкие задачи, например поднимать пациентов, не подвергая их опасности.

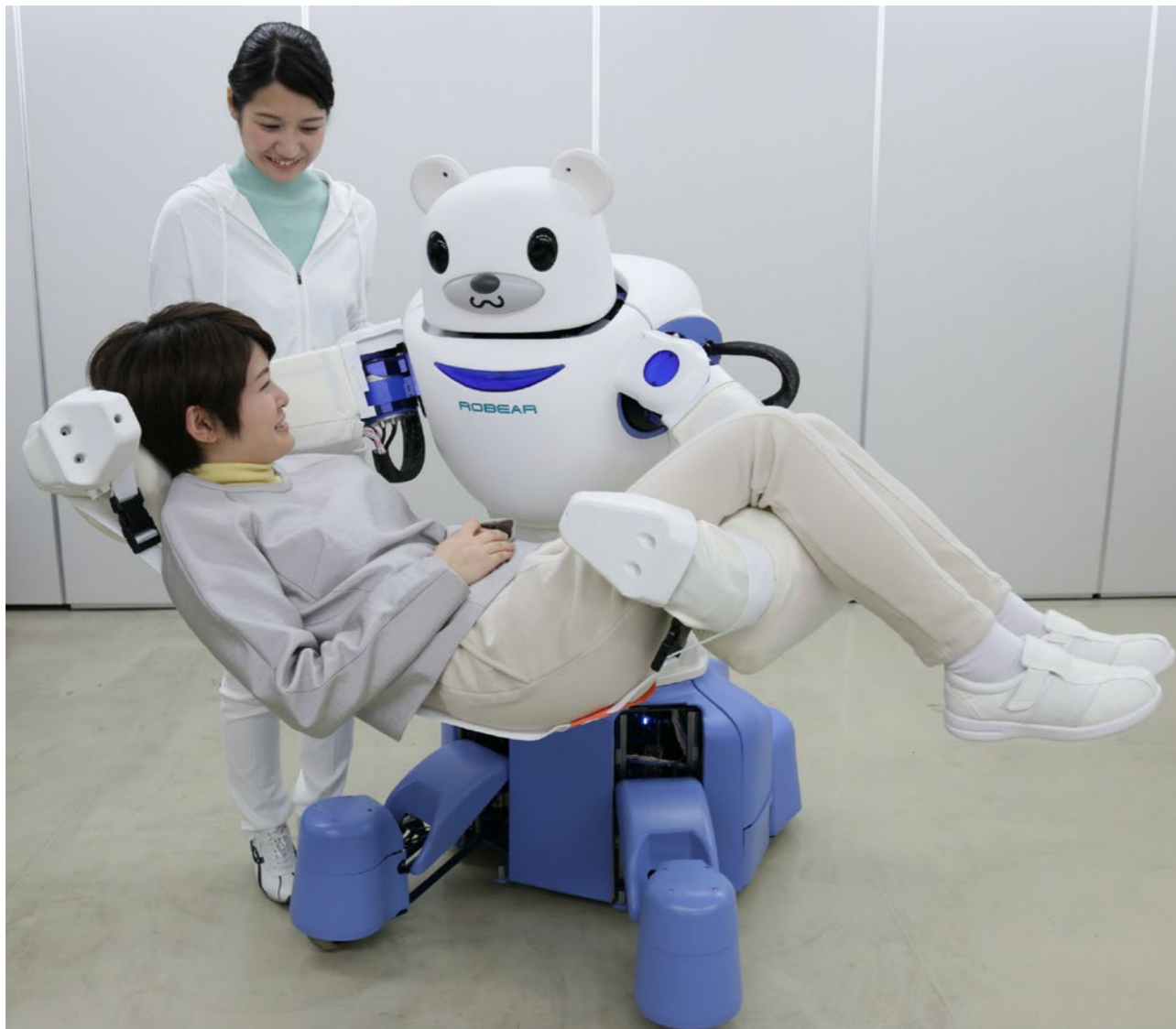


Рис. 25 Система ROBEAR компании RIKEN [41].

Robear – это второе поколение передовых вспомогательных роботов, разработанных компанией Riken. Его предшественник, робот для интерактивной помощи телу RIBA, был первым роботом, способным поднимать или опускать человека с кровати или инвалидной коляски. Первый прототип RIBA мог поднимать до 61 кг. Робот способен реагировать на звуковые и визуальные команды, прикосновения и был обучен распознавать оба лица и голоса.

2.4. НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

Чтобы сконструировать ассистивное устройство, крайне важно понять, как работает человеческое тело. Сокращая скелетные мышцы, наше тело может производить очень сложные и значимые движения. Все эти действия инициируются мыслями в мозге человека и затем передаются через нервную систему к мышцам. Некоторые виды мозговой деятельности (например, потенциал готовности) могут быть произведены за период до 1 секунды до фактического движения и могут быть идентифицированы с помощью ЭЭГ, она фиксирует электрическую активность мозга путем размещения на поверхности головы неинвазивных электродов. Эти инициации движения передаются через ЦНС двигательным нейронам, которые иннервируют мышечные волокна. Затем, после последовательности химических реакций, мышечное волокно сокращается и производит изменение потенциала в мышечной оболочке. Эта электрическая активность вырабатывается во время мышечной деятельности, сокращение может быть зафиксировано с помощью ЭМГ через электрические датчики, помещенные на кожу или под кожу над интересующей мышцей. ЭЭГ и ЭМГ являются своеобразными «окнами» в наш мозг, потому что они записывают его исходящие сигналы и таким образом могут быть использованы для определения намерений пользователя. На рынке представлены вспомогательные устройства (протезы, а также нейрокомпьютерные интерфейсы (НКИ)), которые используют эти сигналы для определения намерений пользователя и управления устройством [42].

НКИ определяется как коммуникационный путь односторонней или двухсторонней связи между мозгом и электронным устройством. Область НКИ очевидно имеет много общего с нейропротезированием, которое является областью нейробиологии и связано с устройствами для компенсации какой-либо нарушенной функции нервной системы.

Наиболее широко используемым нейропротезирующим устройством является кохлеарный имплантат, есть также имплантируемые нейропротезы, которые направлены на восстановление зрения, в том числе сетчатки глаза.

Исследования этой области начались в 1970-х годах в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе (UCLA) (США). В середине 1990-х были разработаны устройства, которые позволили восстановить поврежденные функции слуха, зрения, а также утраченные двигательные навыки.

Развитие НКИ не только помогает накапливать фундаментальные знания о функционировании человеческого мозга, но также открывает простор разнообразному применению. Например, возможность управления конечностями с помощью функциональной электростимуляции (ФЭС) мышц после травм спинного мозга или надление ампутированного человека возможностью плавно оперировать протезами конечностей с возможностью чувствовать то, что воспринимают внешние датчики, НКИ также может быть использован как привод для инвалидной коляски [4, 43] (Рис. 26).



Рис. 26 НКИ в управлении инвалидной коляской [4, 43].

3. РАЗВИТИЕ АССИСТИВНЫХ БИОМЕХАТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ

В России ведутся научные исследования и разрабатываются как отдельные элементы, так и комплексные устройства ассистивной биомехатроники.

По отдельным направлениям (3D-печать, протезы верхних конечностей, экзоскелеты) уже наработаны «заделки» – накоплены знания, компетенции, создана инфраструктура, имеются готовые разработки, которые могут быть использованы для форсированного развития этой сферы.

Однако в ряде направлений (бионические глаза, протезы нижних конечностей и др.) обнаруживаются «белые пятна» – существенное отставание от мирового уровня.

Исследования и синтез новых функциональных олигомерных и полимерных материалов для различных элементов и устройств мягкой робототехники (искусственные мышцы и кожа, электронные нос, язык, глаз), финансируемые Российским научным фондом, проводятся в Институте полимерных и синтетических материалов им. Н. С. Ениколопова РАН. Данные работы выполняются в период с 2019 по 2022 г. [44].

Исследования в области разработки трехмерного биоразлагаемого матрикса для регенеративной медицины ведутся в Сибирском федеральном университете. Совместно с коллегами из Германии для формирования каркаса применяются методы обработки биосинтетического полимера поли-3-гидроксибутират, которые позволили существенно улучшить его свойства для прикрепления и размножения клеток.

Ученые Томского политехнического университета предложили новый способ модифицирования поверхности биodeградируемых полимерных скаффолдов из поликапролактона – каркасов, которые служат основой для выращивания новых органов и тканей. Он позволяет создавать тканеинженерные скаффолды повышенной биосовместимости для тканевых сосудистых трансплантатов, использующихся, например, в кардиологии [45].

В Кубанском государственном медицинском университете были проведены исследования, подтвердившие биосовместимость ацеллюлярных матриксов на

модели легких приматов, максимально приближенной по анатомо-морфологическим характеристикам к легким человека, для создания тканеинженерных конструкций [46].

Исследования в области 3D-печати органов ведет компания 3D Bioprinting Solutions – лаборатория биотехнологических исследований, основанная частной медицинской компанией InVitro. В 2014 году лабораторией был создан первый отечественный биопринтер. Деятельность лаборатории включает разработку и производство биопринтеров и материалов в области трехмерной биопечати, разработку новых технологий в биофабрикации и лекарственных препаратов. Специалисты 3D Bioprinting Solutions в 2018 году разработали бескаркасную технологию 3D-печати биологических тканей с использованием эмбриональных клеток совместно с учеными Объединенного института высоких температур РАН [47].



Рис. 27 3D-принтер компании 3D Bioprinting Solutions [47].

Протезные изделия верхних конечностей современного уровня на постоянной основе разрабатывают и производят две российские компании – «Моторика» и Max-Bionic [48, 49].

Компания «Моторика», резидент «Сколково», разрабатывает активные бионические протезы кисти и предплечья, в том числе роботизированные протезы с ЭМГ-управлением движением пальцев. Компания использует современные технологии

производства с применением промышленной 3D-печати пластиком и металлом, двигатели, которые используются в аэрокосмической индустрии, а также «умную электронику» (Рис. 28).

Проект «БиЛайна» и «Моторики» по удаленному мониторингу высокотехнологичных ассистивных устройств победил в номинации Best Use of Mobile for Accessibility & Inclusion международного конкурса GSMA Global Mobile Awards 2019 в Барселоне (Испания). Проект представляет собой объединение существующих бионических протезов с технологиями мобильного оператора.

Также инженеры компании «Моторика» разработали платформу реабилитации с помощью VR-технологии ATTILAN – многопользовательскую платформу VR-реабилитации, которая способна обеспечить эффективное обучение пациентов с протезами верхних конечностей в формате игры.

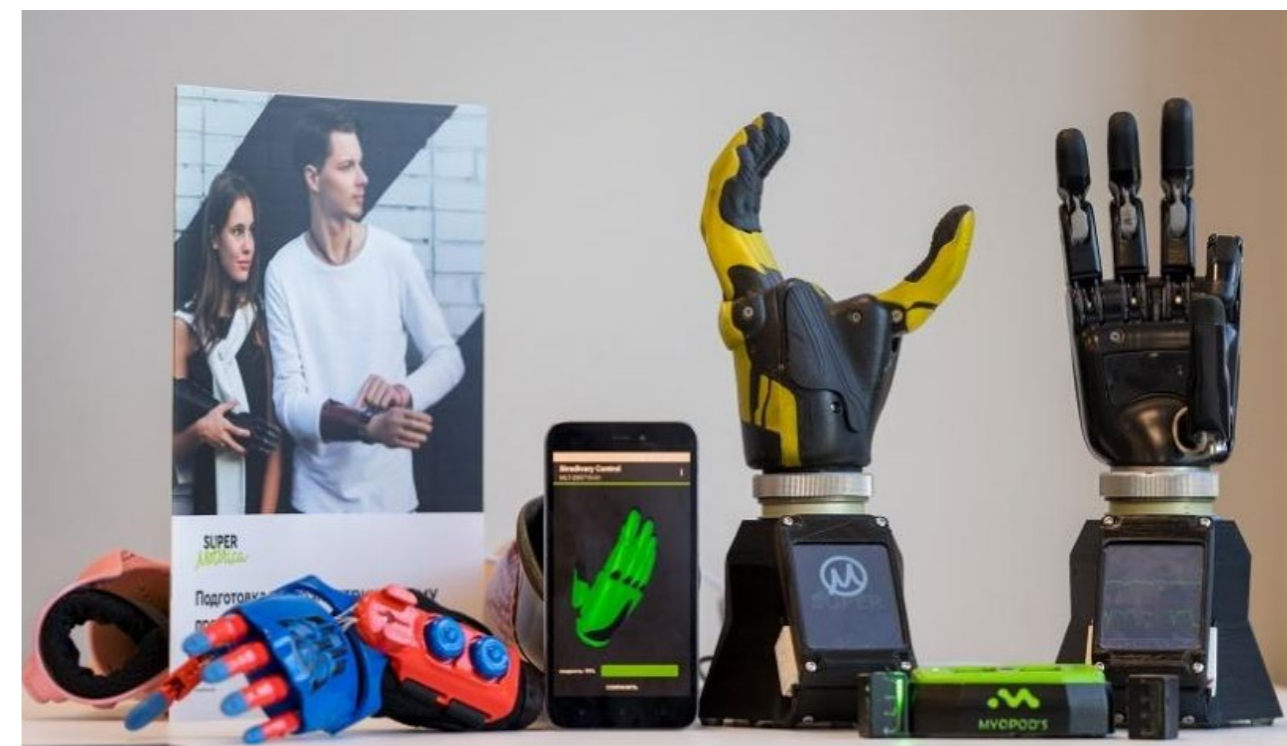


Рис. 28 Протезы верхних конечностей компании «Моторика» [48].

Компания MaxBionic также является резидентом «Сколково» и специализируется на разработке и производстве биоэлектрических многосхватных протезов кисти MeHands (Рис. 29). Основными преимуществами протезов MeHands являются: цена, технологичность и гибкая платформа управления, благодаря которой протез может обновлять прошивку, как обычный смартфон, и менять алгоритм управления, также он совместим с ЭМГ-датчиками других производителей.



Рис. 29 Протезы кисти компании MaxBionic [49].

Протезами нижних конечностей в России занимается компания НПФ «Орто-Космос», созданная в 1992 году на базе ракетно-космической корпорации «Энергия». Основной профиль деятельности компании – комплектация протезов, в том числе бионических, состоящих из модулей разных производителей, благодаря чему достигается максимальная кастомизация для каждого отдельного пациента. Большая часть работы в «Орто-Космос» сфокусирована на индивидуальной разработке гильз – мест соединения конечности и протеза. Кроме сборки и установки протезов, большое внимание уделяется обучению пациентов [50].

Компания «Катэrvиль», резидент «Сколково», занимается разработкой и производством высокотехнологичных средств реабилитации инвалидов, в частности с известным в мире продуктом – инвалидной коляской с электроприводом – ступенькоходом Caterwil GTS, которая позволяет человеку самостоятельно подниматься и спускаться по лестницам (Рис. 30) [51].

Также на международном рынке известны коляски-вездеходы российской компании «Обсервер», резидента ОЭЗ «Калининград», позволяющие преодолевать сложные рельефы и спускаться по лестнице на несколько этажей [52] (Рис. 31).



Рис. 30 Коляска компании «Катэrvиль» [51].



Рис. 31 Коляска компании «Обсервер» [52].

В России разработкой экзоскелетов занимается множество стартапов, среди них стоит отметить резидента «Сколково» компанию «ЭкзоАтлет» с разработанным роботизированным экзоскелетом, ориентированным на активную реабилитацию пациентов с локомоторными нарушениями нижних конечностей в результате травм, заболеваний опорно-двигательного аппарата или нервной системы [53] (Рис. 32).

Российский стартап «Полезные роботы» совместно с конструкторским бюро «Карфидов Лаб» при инженерной поддержке Лаборатории робототехники Сбербанка разработал экзоскелет ExoChair, предназначенный для разгрузки мышц спины и ног при выполнении работы в положении стоя [54] (Рис. 33). Данный экзоскелет был успешно применен в 2019 году хирургом при проведении 12-часовой операции в областной клинической больнице № 2 г. Ростов-на-Дону.



Рис. 32 Экзоскелет компании «ЭкзоАтлет» [53].



Рис. 33 Экзоскелет ExoChair [54].

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АССИСТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БИОМЕХАТРОНИКИ В СИСТЕМЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ ГОРОДА МОСКВЫ

В городе Москве внедрением технологий 3D-печати для протезирования в формате пилотного проекта занимается Московский городской центр эндопротезирования костей и суставов при ГКБ им. С. П. Боткина, в проекте участвуют не только травматологи, но и нейрохирурги, челюстно-лицевые хирурги. Параллельно идет работа над формированием медицинских стандартов по 3D-технологиям. В 2018 году в центре была проведена вторая в России операция по имплантации тазобедренного сустава, напечатанного на 3D-принтере. В настоящее время в Центре эндопротезирования ежегодно выполняется более 1000 эндопротезирований тазобедренного сустава, около 700 операций по эндопротезированию коленного сустава.

Московские городские травмпункты предлагают пациентам высокотехнологичную замену гипсу – 3D-печатные ортезы компании «Здравпринт». Разработчики создали технологию автоматизированного построения модели ортеза по фотографии поврежденной конечности. В частности, ортезы доступны в Городской клинической больнице № 4, а также в новом травмпункте Центра травматологии и ортопедии Городской клинической больницы № 67 им. Л. А. Ворохобова.

Экзоскелетами «ЭкзоАтлет» оснащены 8 московских реабилитационных центров. В филиалах № 2 и № 3 Московского научно-практического центра медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины с их помощью реабилитацию проходят пациенты после инсульта, черепно-мозговых травм и травм конечностей, люди с болезнями и повреждениями головного и спинного мозга, периферических нервов, позвоночника и суставов. В ГКБ им. Ф. И. Иноземцева экзореабилитация используется для пострадавших в технических авариях, катастрофах, при взрывах, пожарах, террористических актах. В ГКБ № 67 им. Л. А. Ворохобова этот вид реабилитации используется для пациентов после инсультов, при травмах и патологиях позвоночника, повреждениях опорно-двигательного аппарата, центральной и периферической нервной системы. В ГКБ им. В. М. Буянова тоже проходят реабилитацию пациенты с различными травмами.

Отделение реабилитации ГКБ № 1 имени Н. И. Пирогова использует экзореабилитацию также для восстановления после травмы позвоночника с повреждением спинного мозга в грудном или поясничном отделах с параплегией или парапарезом.

Реабилитация проходит на базе Регионального сосудистого центра в рамках полиса ОМС, проводится 10-дневный курс.

Также экзореабилитация проводится в реабилитационных центрах, подведомственных Департаменту труда и социальной защиты населения города Москвы.

В ГБУ города Москвы «Научно-практический реабилитационный центр» проведены пилотные испытания экзотренажера «Аника» с биологической обратной связью, служащего для восстановления мелкой моторики и координации. Перчатка используется при реабилитации пациентов с повреждениями головного и спинного мозга, при восстановлении моторики рук после перенесенных операций и травм. Лечение производится в легкой игровой форме, что позволяет поддерживать у пациента высокий уровень мотивации. Инновационная перчатка позволяет пациентам восстанавливать работоспособность рук даже в домашних условиях не только после перенесенных травм и операций, но и после инсульта, при ДЦП и болезни Паркинсона.

Ассистивные технологии дают людям возможность быть здоровыми, продуктивными, независимыми и сохранять достоинство, также получать образование, выходить на рынок труда и участвовать в жизни общества. Ассистивные технологии снижают потребность в формальных услугах здравоохранения, долгосрочном уходе и услугах опекунов.

К категориям лиц, в наибольшей степени нуждающихся в ассистивных технологиях, относятся:

- инвалиды;
- люди пожилого возраста;
- больные неинфекционными заболеваниями, такими как диабет и инсульт;
- люди с психическими нарушениями, включая деменцию и аутизм;
- люди, страдающие от постепенного угасания функциональных возможностей.

Национальная ассоциация участников рынка ассистивных технологий «АУРА-Тех» оценивает объем рынка технологических средств реабилитации в России в 40 млрд руб., а Агентство стратегических инициатив – в 60 млрд руб. При этом в агентстве отмечают, что российский рынок высокотехнологичных средств реабилитации находится на начальном этапе развития и более 50 % специальных товаров сегодня импортируется [55]. Переход от косметического протезирования к функциональному на горизонте семи лет увеличит этот рынок в среднем в пять раз.

Рынок бионических ассистивных устройств довольно специфический: игроков на международной арене не так уж много, но в то же время конкуренция достаточно высока. Тем не менее отрасль перспективна, во-первых, в связи с большим количеством нуждающихся, а во-вторых – с отсутствием подходящих альтернатив.

Для поддержки отрасли необходимо стимулировать отечественные разработки не только на этапе R&D, но и расширять классификации технических средств реабилитации, включать продукцию в государственные программы протезирования и реабилитации. За государством важно оставить функции контроля за качеством производства.

Учитывая, что биомехатроника – это междисциплинарная наука и наиболее известные в мире лаборатории и команды исследователей и разработчиков состоят из представителей различных сфер, необходимо организовывать более тесное взаимодействие между инженерами и медицинскими специалистами в процессе разработки и тестирования ассистивных устройств. Профессионалы в области

разработки биомехатронных устройств должны обладать в значительной мере сильными компетенциями, так как технологический уровень разработок в этой сфере традиционно высокий.

Важной проблемой также является отсутствие информированности как пациентов, так и медицинских специалистов о наличии на рынке новейших разработок в сфере ассистивных устройств.

Положительным опытом по поддержке инновационных проектов и объединения разработчиков и потребителей является реализованная Правительством Москвы программа «Открытые запросы», в рамках которой город дает возможность высокотехнологичным компаниям предложить и протестировать в городской среде инновационные решения для актуальных задач городского хозяйства, в том числе в сфере здравоохранения. В настоящее время данная инициатива продолжается в формате программы «Пилотные тестирования», которая позволяет инновационным компаниям получить доступ к городской или коммерческой организации (площадке) для пилотного тестирования как к первому заказчику или потребителю инновационного решения, получить рекомендации по кастомизации данного решения. Организации получают возможность узнать и получить подборку лучших инновационных решений, способствующих реализации собственных приоритетных задач.

Среди достижений в области технологий здравоохранения ассистивные биомедицинские технологии позиционируются в качестве одного из основных факторов развития глобальной экономики. Технические средства и вспомогательные устройства для пожилых людей или людей с ограниченной подвижностью привлекают больше внимания вследствие общего постарения человечества. Спрос на биомехатронные устройства в мире находится на рекордно высоком уровне и не показывает признаков снижения. Ассистивная биомехатроника становится актуальной значимой технологией для улучшения системы здравоохранения.

1. <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>
2. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/70670/WHO_NMH_VIP_11.01_eng.pdf?sequence=1
3. Marko B. Popovich, Introduction, Biomechatronics, Academic press, 2019, 1-9, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812939-5.00001-X>
4. Minas Liarokapis, Kathleen A. Lamkin-Kennard, Marko B. Popovich, Biomechatronics: A New Dawn, Biomechatronics, Academic press, 2019, 543-566, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812939-5.00018-5>
5. Ahmed A. Arshi, Chapter One – Introduction, Handbook of Biomechatronics, Academic press, 2019, 3-29, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00001-5>
6. Reva E. Johnson, Jonathon W. Sensinger, Chapter Two - Actuator Technologies, Handbook of Biomechatronics, Academic press, 2019, 31-59, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00002-7>
7. Jeff Christenson, Chapter Three - Sensors and Transducers, Handbook of Biomechatronics, Academic press, 2019, 61-93, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00003-9>
8. Kathleen A. Lamkin-Kennard, Marko B. Popovic, Sensors: Natural and Synthetic Sensors, Biomechatronics, Academic press, 2019, 81-107, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812939-5.00004-5>
9. A. Miriyev, K. Kenneth Stack, H. Lipson, Soft material for soft actuators, Nat. Commun. 8 (2017), <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00685-3>
10. <https://softroboticstoolkit.com/foam-based-soft-actuators/design>
11. <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/an-edible-actuator-for-ingestible-robots>
12. J. Wade, T. Bhattacharjee, C. Kemp, Force and thermal sensing with a fabric-based skin, in: IROS Workshop on See, Touch, and Hear: 2nd Workshop on Multimodal Sensor-Based Robot Control for HRI and Soft Manipulation, 2016.
13. <http://bdml.stanford.edu/Main/TactileSensing>
14. B.J. Jank, L. Xiong, P.T. Moser, J.P. Guyette, X. Ren, C.L. Cetrulo, D.A. Leonard, L. Fernandez, S. P. Fagan, H.C. Ott, Engineered composite tissue as a bioartificial limb graft, Biomaterials 61 (2015), 246–256, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aag0508>
15. M.S. Mannoor, Z. Jiang, T. James, Y.L. Kong, K.A. Malatesta, W.O. Soboyejo, N. Verma, D.H. Gracias, M.C. McAlpine, 3D printed bionic ears, Nano Lett. 13 (6) (2013) 2634–2639, <https://doi.org/10.1021/nl4007744>
16. Gu, L., Poddar, S., Lin, Y. et al. A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina. Nature 581, 278–282 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2285-x>
17. B.J. Jank, L. Xiong, P.T. Moser, J.P. Guyette, X. Ren, C.L. Cetrulo, D.A. Leonard, L. Fernandez, S.P. Fagan, H.C. Ott, Engineered composite tissue as a bioartificial limb graft, Biomaterials 61 (2015), 246–256, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.04.051>
18. Ashish, Ahmad, N., Gopinath, P., & Vinogradov, A. 3D Printing in Medicine. 3D Printing Technology in Nanomedicine, 2019, 1–22, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815890-6.00001-3>
19. A.M. Dollar, R.D. Howe, The SDM hand as a prosthetic terminal device: a feasibility study, in: IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2007. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428542>
20. M.K. Shepherd, E.J. Rouse, The VSPA foot: a quasi-passive ankle-foot prosthesis with continuously variable stiffness, IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 25 (12) (2017) 2375–2386. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2017.2750113>
21. E. Saint-Elme, M.A. Larrier Jr., C. Kracinovich, D. Renshaw, K. Troy, M. Popovic, Design of a biologically accurate prosthetic hand, in: Extended Abstracts Proceedings of the International Symposium on Wearable Robotics (WeRob 2017), Houston, Texas (USA), November 5–8, 2017, DOI: 10.1109/WEROB.2017.8383866
22. G.P. Kontoudis, M.V. Liarokapis, A.G. Zisimatos, C.I. Mavrogiannis, K.J. Kyriakopoulos, Open-source, anthropomorphic, underactuated robot hands with a selectively lockable differential mechanism: towards affordable prostheses, in: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg (Germany), 2015. DOI: 10.1109/IROS.2015.7354209
23. M.S. Johannes, J.D. Bigelow, J.M. Burck, S.D. Harshbarger, M.V. Kozlowski, T. Van Doren, An overview of the developmental process for the modular prosthetic limb, Johns Hopkins APL Tech. Dig. 30 (3) (2011) 207–216
24. C. Connolly, Prosthetic hands from touch bionics, Ind. Robot Int. J. 35 (4) (2008) 290–293. <https://doi.org/10.1108/01439910810876364>
25. M. Luchetti, G. Verni, R. Sacchetti, N. Rossi, Impact of michelangelo prosthetic hand: findings from a crossover longitudinal study, J. Rehabil. Res. Dev. 52 (5) (2015) 605, <https://doi.org/10.1108/01439910810876364>
26. Bertos, G. A., & Papadopoulos, E. G. (2019). Upper-Limb Prosthetic Devices. Handbook of Biomechatronics, 177–240. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812539-7.00006-4>
27. Philipp Beckerle, Steffen Willwacher, Minas Liarokapis, Matthew P. Bowers, Marko B. Popovic, Prosthetic Limbs, Biomechatronics, Academic press, 2019, 235-278, <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04132-3>

28. Marko B. Popovic, Powered Orthotics: Enabling Brace Technologies for Upper and Lower Limbs, Biomechatronics, Academic press, 2019, 279-303, <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04132-310.1016/B978-0-12-812939-5.00010-0>
29. B.B. Kang, et al., Development of a polymer-based tendon-driven wearable robotic hand, in: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487562.
30. Dmitry A. Sinyukov, Karen L. Troy, Matthew P. Bowers, Taskin Padir, Wheelchairs and Other Mobility Assistance, Biomechatronics, Academic press, 2019, 374-412, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812939-5.00013-6>
31. D.L. Kamen, R.R. Ambrogi, J.D. Heinzmann, R.K. Heinzmann, D. Herr, J.B. Morrell, Control of a Balancing Personal Vehicle, US6443250B1, 2002.
32. Cyberdyne, Inc., press release, 2017, https://www.cyberdyne.jp/wp_uploads/2017/09/20170925_FB02_eNG.pdf
33. Cyberdyne, Inc., press release, https://www.cyberdyne.jp/wp_uploads/2017/11/20171114_kessanhosokusetsumei_ENG.pdf
34. Freedom of Motion: The Story of Honda Walking Assist. Honda, <https://www.honda.com/mobility/walking-assist-technology>
35. Assistive Technology: Samsung Gem's Exoskeleton <http://ixd.prattsi.org/2020/02/samsung-gems-exoskeleton/>
36. Powered Arm Brace For Restored Movement—Stroke Rehabilitation, Portable Robotic Arm Brace, NeuroRobotic Technology. myomo@home program, <http://www.myomo.com/>
37. <http://rewalk.com/>
38. <https://eksobionics.com/>
39. Andres F.Ruiz-Olaya, AlbertoLopez-Delis, Adson Ferreirada Rocha, Chapter Eight - Upper and Lower Extremity Exoskeletons, Handbook of Biomechatronics, Academic press, 2019, 283-317, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00011-8>
40. Panizzolo, F.A., Galiana, I., Asbeck, A.T. et al. A biologically-inspired multi-joint soft exosuit that can reduce the energy cost of loaded walking. J NeuroEngineering Rehabil 13, 43 (2016). <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0150-9>
41. <http://rtc.nagoya.riken.jp/RIBA/index-e.html>
42. Mehrabi, N., & McPhee, J. (2019). Model-Based Control of Biomechatronic Systems. Handbook of Biomechatronics, 95–126. <https://doi:10.1016/b978-0-12-812539-7.00004-0>
43. Tashiro, H., Popovic, M. B., Iramina, K., Terasawa, Y., & Ohta, J. (2019). Direct Neural Interface. Biomechatronics, 139–174. <https://doi:10.1016/b978-0-12-812939-5.00006-9>
43. <https://www.rscf.ru/contests/search-projects/19-73-30028/>
44. <http://www.sib-science.info/ru/heis/dlya-kletki-13042018>
46. Кувейда Е. В., Губарева Е. А., Гуменюк И. С., Каралоглы Д. Д. Изучение биосовместимости ацеллюлярных матриц легких приматов и возможностей их использования в качестве тканеинженерных конструкций, Современные технологии в медицине, 9(4):82, 2017, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.4.10>
47. <https://bioprinting.ru/>
48. <https://motorica.org/>
49. <https://www.maxbionic.com/>
50. <https://orto-kosmos.ru/>
51. <https://caterwil.ru/>
52. <https://o-mp.ru/>
53. <https://exoatlet.ru/>
54. <https://karfidovlab.com/projects/exochair/>
55. 7 цифровых решений из Москвы для людей с ограниченными возможностями здоровья, <https://lk.czn.mos.ru/News/Detail/8b31add2-6254-4ec7-a297-e20fe412b1e0>

Экспертный обзор

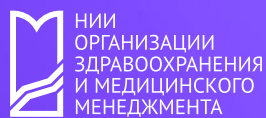
Е. И. Аксенова, Н. Н. Камынина, С. Ю. Горбатов

ТЕХНОЛОГИИ АССИСТИВНОЙ БИОМЕХАТРОНИКИ

Корректор Е. Н. Малыгина
Дизайн и верстка: Г. А. Пекный

Подписано в печать 15.07.2020 г.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 34,41
Тираж 100 экз.
Заказ No 50

Отпечатано в ГБУ «НИИОЗММ ДЗМ»
115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 9
Тел.: 8 (495) 530-12-89



ТЕХНОЛОГИИ АССИСТИВНОЙ БИОМЕХАТРОНИКИ

