



Значение современных роботизированных реабилитационных технологий для улучшения функции верхней конечности

Е.А. Бирюков, И.П. Ястребцева ✉

ФГБОУ ВО «Ивановская государственная медицинская академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации; Россия, г. Иваново

РЕЗЮМЕ

Цель обзора: рассмотреть эффективность применения различных роботизированных реабилитационных устройств в работе по улучшению функции руки у пациентов с церебральной патологией.

Основные положения. На рынке медицинского оборудования имеется множество разнообразных роботизированных устройств для реабилитации больных. На данный момент вопрос сочетания различных реабилитационных техник остается открытым, ведутся научные исследования, которые с разных позиций подходят к вопросу восстановления движений.

Заключение. Вариабельность технических решений и результатов применения реабилитационных технологий требует дальнейшего углубленного анализа факторов, определяющих результативность их применения, и разработки индивидуализированных подходов воздействия.

Ключевые слова: инсульт, нейрореабилитация, экзоскелет, роботизированные комплексы.

Вклад авторов: Бирюков Е.А. — сбор материала, обработка, интерпретация данных, написание текста рукописи; Ястребцева И.П. — разработка концепции обзора, проверка критически важного содержания и редакция, утверждение рукописи для публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Бирюков Е.А., Ястребцева И.П. Значение современных роботизированных реабилитационных технологий для улучшения функции верхней конечности. Доктор.Ру. 2022; 21(8): 39–43. DOI: 10.31550/1727-2378-2022-21-8-39-43

The Role of Modern Robot-aided Rehabilitation Technologies for the Improvement of the Upper Extremity Functions

Е.А. Biryukov, I.P. Yastrebtseva ✉

Ivanovo State Medical Academy (a Federal Government-funded Educational Institution of Higher Education), Russian Federation Ministry of Health; 8 Sheremetevsky Prospect, Ivanovo, Russian Federation 153012

ABSTRACT

Objective of the Review: To discuss the efficiency of using various robot-aided rehabilitation devices in order to improve the upper extremity functions in patients with cerebral pathologies.

Key Points. The medical devices market is abundant in various robot-aided devices for patient rehabilitation. Currently, the issue of combining various rehabilitation techniques is still open; scientific researches are ongoing which aim at analysing the problem of gain of motion.

Conclusion. The variability of technical solutions and results of the use of rehabilitation techniques requires further deep analysis of factors determining the efficiency of their use, and development of personified approaches to the management.

Keywords: stroke, neurorehabilitation, exoskeleton, robot-aided complexes.

Contributions: Biryukov, E.A. — material collection, processing, data interpretation, text of the article; Yastrebtseva, I.P. — concept of the review, review and editing of critically important material, approval of the manuscript for publication.

Conflict of interest: The authors declare that they do not have any conflict of interests.

For citation: Biryukov E.A., Yastrebtseva I.P. The Role of Modern Robot-aided Rehabilitation Technologies for the Improvement of the Upper Extremity Functions. Doctor.Ru. 2022; 21(8): 39–43. (in Russian). DOI: 10.31550/1727-2378-2022-21-8-39-43

Медицинская реабилитация представляет собой комплекс мероприятий медицинского и психологического характера, направленных на полное или частичное восстановление нарушенных и (или) компенсацию утраченных функций пораженного органа либо системы организма, поддержание функций организма в процессе завершения остро развившегося патологического процесса или обострения хронического патологического процесса в организме, а также на предупреждение, раннюю диагностику и коррек-

цию возможных нарушений функций поврежденных органов либо систем организма, предупреждение и снижение степени возможной инвалидности, улучшение качества жизни, сохранение работоспособности пациента и его социальную интеграцию в общество¹.

Реабилитационное обучение должно основываться на нейрорезультатах представлений, независимо от того, выполняется ли оно ручным способом или с помощью роботизированных устройств [1].

✉ Ястребцева Ирина Петровна / Yastrebtseva, I.P. — E-mail: ip.2007@mail.ru

¹ Приказ Министерства здравоохранения РФ от 31.07.2020 № 788н «Об утверждении Порядка организации медицинской реабилитации взрослых».



Успешная нейрореабилитация реализуется через активацию нейропластичности — способности нервной системы в ответ на внешние и внутренние изменения адаптироваться путем оптимальной структурно-функциональной перестройки в корковых и подкорковых структурах [2].

Сама нейропластичность зависит от ряда факторов: возраста, причины повреждений и исходного статуса, включая влияние среды и генетической предрасположенности, когнитивных нарушений, психоэмоционального состояния [1, 3]. Важно также учитывать преморбидный фон пациентов [4].

У больных, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения, часто отмечается высокий уровень тревоги и депрессии, низкая мотивация к восстановлению [5]. Следует отметить, что чем сильнее выражены мнестические расстройства, тем значительнее проявляются перечисленные состояния и хуже эффект от проводимых тренингов [3]. В этой связи необходимо учитывать состояние когнитивных функций в составлении реабилитационных программ с добавлением специфических коррекционных мероприятий.

Отсутствие мотивации к терапии часто ограничивает реабилитационный потенциал больных [6, 7]. Возможными причинами этого состояния могут быть восприятие пациентами того, что терапия направлена исключительно на адаптацию к патологическому состоянию, а не на полное выздоровление, отсутствие обнадеживающей обратной связи от врача. Логистические, финансовые и личные барьеры также могут ограничивать эффективность традиционной физической терапии и приверженность долгосрочной реабилитации. В качестве потенциального решения данной проблемы можно назвать ведение разъяснительных бесед с пациентами, внедрение психокоррекционных и цифровых (игровых, интерактивных) методик роботизированного воздействия, которые набирают популярность в области нейрореабилитации.

Для активации процесса нейропластичности и улучшения моторных возможностей больных необходимо применять принцип двигательного научения [8] в контексте полной двигательной схемы, содержащей сенсорные сигналы, которые взаимодействуют с когнитивными операциями (планирование движения, внимание и мотивация) [1].

По уровню организации двигательного акта, согласно уровням построения движений по Н.А. Бернштейну, во время осуществления реабилитационных заданий возможно проводить работу на уровне элементарных функций (уровень А) и тренировку сложных моторных актов (уровни В и С) [9, 10].

Важным фактором научения является должное количество повторений. Пациентам, исходя из переносимости нагрузок, рекомендуется получать ежедневно от 1 до 3 ч мероприятий в «режиме среднеинтенсивной реабилитации», не менее 3 ч в режиме «интенсивной реабилитации» при общей длительности курса не менее 10 дней на каждом этапе реабилитации [11], а на третьем этапе — не менее 3 ч не реже, чем каждые 48 ч.

Все виды двигательного научения зависят от функционирования и взаимодействия нейронных систем, а не отдельных структур [12]. Для эффективного ответа больного, результативного выполнения любых двигательных заданий необходима достаточная обратная связь (ответ), участвующая в реорганизации нейронных сетей внутри головного мозга [1].

Биологическая обратная связь представляет собой канал передачи информации о биологической деятельности индивида, которая собирается, обрабатывается и поступает обратно к нему [12]. Проявляется она в разных модуляциях (зрительной, слуховой, проприоцептивной), является сигналом

для пациента о правильном выполнении заданных действий или о необходимости его изменения для правильного выполнения задач [1].

В своей работе О. Ozen и соавт. высказали мнение, что отсутствие сенсорной обратной связи во время тренинга в процессе роботизированного обучения может снижать результативность тренировок [14]. Более того, ученые подчеркнули значимость тактильной биологической обратной связи как для выработки, так и для закрепления двигательного акта.

На данный момент вопрос сочетания различных реабилитационных техник остается открытым, ведутся научные исследования, которые с разных сторон подходят к вопросу восстановления движений. Для формирования двигательного навыка и следов двигательной памяти за счет моторного научения можно использовать различные сочетания реабилитационных приемов [1]. Важно проанализировать эффективность использования различного оборудования при работе с пациентами в восстановлении простых и сложных двигательных навыков, применяя различные средства мануальной терапии и кинезиотерапии. Так, А. Frisoli и соавт. пришли к выводу, что тренинг с использованием роботизированных технологий (экзоскелета) для верхней конечности может привести к лучшим функциональным результатам по сравнению с мануальной терапией [15].

D. Kim и соавт. изучали комбинацию зеркальной и роботизированной терапии [16]. У 9 здоровых человек и 5 пациентов с инсультом во время теста сжатия, выполняемого изолированно во время зеркальной, роботизированной и комбинированной зеркально-роботизированной терапии, при помощи функциональной ближней инфракрасной спектроскопии неинвазивно измеряли активацию мозга. Анализировали эффективность отдельных видов реабилитационных мероприятий и их сочетания. Результаты показали, что зеркально-роботизированная терапия способствует большей активации нейронов моторной коры головного мозга по сравнению с отдельно проводимой зеркальной и роботизированной терапией. Сочетание визуальной, сенсорной обратной связи при реализации моторного акта важно для большей стимуляции моторной коры пораженной руки.

Роботизированная техника должна обеспечивать целенаправленную физическую поддержку, адаптированную к функциональным способностям пациента при обязательном наличии достаточной обратной связи. Данное требование важно для проектирования, приборостроения и управления такими системами [17].

Структура роботов содержит следующие части:

- управляющую;
- двигательную;
- коммуникационную;
- манипуляционную;
- информационно-измерительную.

Показаниями для использования роботизированных систем являются нарушения моторных навыков верхней конечности вследствие инсульта, черепно-мозговой травмы и других заболеваний центральной нервной системы, в том числе послеоперационных осложнений. В то же время препятствуют адекватному выполнению реабилитационных заданий и ограничивают использование данных систем двигательные нарушения тяжелой степени, не позволяющие пациенту поддерживать позу, необходимую для корректного выполнения заданий; нарушения зрения в степени, не позволяющей выполнять визуальные инструкции на экране монитора; нарушения памяти, внимания, речи, исключаящие

продуктивный контакт со специалистом; высокая степень спастичности в мышцах руки.

Роботизированные системы различаются по назначению (реабилитационные, хирургические и т.д.), системам управления, основным функциям (персональный уход), техническим характеристикам системы (энд-эффекторы; экзоскелеты), используемой стратегии контроля (препрограммируемые и программируемые в процессе выполнения тренировок), мобильности (носимые — экзокостюм, мобильные и стационарные), а также принципам воздействия с включением биологической обратной связи (сенсорная перчатка «Аника»), наличию системы разгрузки сегмента тела (Armeo) и возможностям реализации пассивно-активных упражнений (экзоскелеты) у пациентов с разной степенью выраженности двигательных расстройств (пареза) [12–18].

Примерами роботизированных устройств для реабилитации верхней конечности являются MIT-MANUS (Interactive Motion Technologies), Mirror-Image Motion Enable (MIME) robot, Armeo, HEXORR, Robotic sensory trainer, Amadeo, перчатки GloReha, «Аника» [5, 18, 19]. Данные аппараты различны по механизмам действия, технологиям реабилитации, степени включенности пациента в процесс.

По своему строению MIT-MANUS [16, 20–24], HEXORR [22], MIME robot [23, 24], комплекс Amadeo [25], Armeo [26] представляют собой жесткие роботизированные экзоскелеты с возможностью совершать тренировки в активно-пассивном режиме. Некоторые из них, а именно комплекс Armeo, HEXORR позволяют за счет встроенных двигателей проводить пассивные тренировки у пациентов с выраженным парезом/плегией верхней конечности на ранней стадии реабилитации (в случае невозможности выполнения пациентом поставленной реабилитационной задачи) [18]. У перчаток GloReha [27] и «Аника» [19] отличительной особенностью является открытая ладонная поверхность, что позволяет сохранить тактильный (сенсорный) контакт с предметом во время выполнения бытовых упражнений, а отсутствие встроенных систем помощи движений ограничивает их применение у больных с плегией верхней конечности.

В исследовании с применением реабилитационной перчатки «Аника» 42 пациентов с нарушением тонкой моторики кисти после первичного ишемического инсульта в бассейне правой ($n = 19$) и левой ($n = 23$) средней мозговой артерий (средний возраст 60,9 года, длительность заболевания 6–12 мес) рандомизировали на основную ($n = 22$) и контрольную ($n = 20$) группы [19]. Тренировки проводили ежедневно по 1 ч для каждой руки, всего 10 занятий. У пациентов основной группы было зафиксировано статистически значимое улучшение согласно большинству методов оценки функционального статуса (по шкале спастичности Ашфорта), а также достоверное улучшение независимости и активности в повседневной жизни на основании индекса Бартел, теста Френчай, ARAT, теста «девять колышков и девять отверстий» и шкалы функциональной независимости по сравнению с группой контроля.

Большинство представленных устройств мономануальные. Бимануальным является MIME robot, который можно использовать в зеркальной и зеркально-роботизированной реабилитации [23, 24].

Целью реабилитационного воздействия могут быть разные сферы нарушенной функциональности, обусловленной как чувствительными расстройствами, так и реализацией движения. Robotic sensory trainer и Amadeo используют для стимуляции проприоцептивной чувствительности вибрационные двигатели под подушечками пальцев, проксимальными фалангами и проксимальной частью ладони, хотя в публикациях отмечается, что данная функция роботов не является основной [24, 27].

Вариантом устройства для тренинга элементарных движений может служить MIT-MANUS [20] и робот-экзоскелет руки Hand Exoskeleton Rehabilitation Robot — HEXORR [21].

MIT-MANUS реализует абдукцию/аддукцию в плечевом суставе и флексию/экстензию в локте, давая возможность осуществлять тренировки не только отдельных движений в определенных одноплоскостных направлениях, но и сложноплоскостных двигательных актов [20, 21].

Интересен вопрос эффективности применения роботизированных техник по сравнению со стандартной кинезиотерапией. Так, на примере использования MIT-MANUS/InMotion 2 (30 сессий роботизированной терапии) в сопоставлении с результативностью 30 занятий стандартной кинезиотерапией в раннем восстановительном периоде инсульта было показано, что пассивный объем движений в плечевом и локтевом суставах возрастал в обеих группах в конце лечения [21]. Тем не менее статистически значимое преимущество наблюдалось в группе пациентов, в которой осуществлялась роботизированная реабилитация. В клиническом исследовании с участием 96 пациентов после 2 нед от начала инсульта также определялась достоверная эффективность 5-недельной терапии в режиме одночасовых тренировочных сессий (500 повторений целенаправленных движений за период тренировки) 5 дней в неделю [24].

Отсутствие существенного влияния роботизированного обучения на уровень мышечной спастичности по сравнению со стандартной терапией отмечено в крупном рандомизированном контролируемом исследовании, которое проводилось с использованием тренажерной системы MIT-Manus у 26 пациентов в периоде остаточных явлений при инсульте [16]. Улучшились показатели по шкале оценки Фугл-Мейера независимо от применения робота ($6,9 \pm 7,8$ против $2,6 \pm 10,9$ балла в контрольной группе). Приведенные данные свидетельствуют о том, что использование данного тренажера эффективно в раннем восстановительном периоде инсульта, а использование в отдаленном периоде требует дальнейшего изучения.

Робот-экзоскелет руки HEXORR предназначен для разработки всех пальцев руки и повышения объема движений за счет сгибательных и разгибательных движений в них, а также разнонаправленных угловых смещений [5, 21]. В исследовании с использованием HEXORR у 9 неврологически здоровых правшей (в возрасте 23–57 лет) и 5 пациентов с инсультом (в возрасте 33–61 года) испытуемые выполняли движения руками в течение 30–60 мин, осуществляя полный объем физиологических движений по точным траекториям, однако достоверных положительных результатов не получено [21].

В метаанализ с использованием MIME были включены пациенты с гемипарезом после ишемического инсульта давностью более 6 мес, которые проходили тренировки в режиме 1 ч в день в течение 2 мес [24]. Больные достигали улучшения по оценочным шкалам оценки Фугл-Мейера, тестам ARATGrasp (захват)/Pinch (взятие) и силы (Grip Strength Test) в отличие от контрольной группы, включающей клинически здоровых добровольцев. Результаты шкал анализировали через 3, 6, 12 и 24 нед. В группе с MIME-терапией отмечалось наибольшее улучшение показателей во всех временных точках по сравнению с контрольной группой. D. Bundy с соавт. выявили среднее улучшение показателей ARAT участников на $6,20 \pm 3,81$ ед. в течение 12 нед, A. Chowdhury с соавт.

сообщили о средней разнице в группе +6,38 кг ($p = 0,06$) и +5,66 кг ($p = 0,05$) по тесту силы и ARAT [24].

При анализе выработки сложных двигательных актов на основе применения Armeo [26], MIME robot [23, 24] и Amadeo [25] получено улучшение трудовых навыков.

Роботизированная система Amadeo, предназначенная для тренинга функции кисти и мелкой моторики, позволяет отрабатывать движения в пальцах (сгибание и разгибание). М. Germanotta с соавт. изучали эффективность роботизированной системы Amadeo у 120 пациентов с инсультом в раннем восстановительном периоде и у 40 пациентов группы сравнения [25]. Обнаружено, что надежность теста-ретеста достоверна для силы пальцев (как при сгибании, так и при разгибании) и мышечного тонуса, причем внутриклассовый коэффициент корреляции был выше 0,9. Сила пальцев (как при сгибании, так и при разгибании) коррелировала с клиническими шкалами оценки мышечной силы и тестом Френчай. Минимальное обнаруживаемое изменение силы было равно 10,6 Н для сгибания пальцев и 3,4 Н для их разгибания. Тест-ретестовая надежность показателей спастичности оказалась низкой.

Длительность выполнения тренинга влияла на результат. Так, в рандомизированном исследовании результативности Armeo, проведенном на базе нескольких реабилитационных центров Англии, приняли участие 30 постинсультных пациентов (средний возраст $54,5 \pm 16,4$ года; время после инсульта $14,7 \pm 26,7$ нед; балл шкалы оценки Фугл-Мейера (двигательный блок) для верхних конечностей $40,7 \pm 14,5$), которым были предложены 3 оценочные сессии [26]. Каждая сессия состояла из 10 повторений упражнения «горизонтальный захват» с регистрацией пяти кинематических параметров: времени выполнения задачи и движения; соотношения

траекторий рук; пиковой скорости; количества пиковых скоростей и подсчета общего балла. Существенные эффекты наблюдались в основном между 3 и 1 сессией относительно времени выполнения задачи ($p = 0,02$), времени выполнения движения ($p = 0,0006$), между 2/3 и 1 — для коэффициента траектории хода руки ($p = 0,026$ и $p = 0,0005$ соответственно) и количества пиков скорости ($p = 0,037$ и $p = 0,0004$ соответственно). Показатели, принятые на сессиях 2 и 3, существенно отличались от показателей на сессии 1.

Кроме результативности применения жестких экзоскелетов, оценивали эффективность мягких экзоскелетов. В исследовании, посвященном экзоскелету Gloreha Hand Rehabilitation, пациенты с инсультом и травмой правого полушария головного мозга прошли 2-недельную программу тренинга [27]. Она состояла из 10 занятий по 30 мин, включая периоды отдыха, 5 дней в неделю в течение 2 нед подряд с обеспечением пассивной мобилизации пальцев. После курса лечения у всех пациентов улучшались показатели тестов пересечения линий, на чтение предложений и привязку Пердью. Однако авторы аккуратны в выводах и ставят вопрос об эффекте плацебо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует множество разнообразных роботизированных методов механотерапии, используемых в реабилитации больных. Данные технологии будут представлять интерес и в дальнейшем. С учетом разноплановости проявлений неврологической патологии, ограничивающих функциональные возможности пациентов, вопросы повышения эффективности применения различных роботизированных устройств для улучшения повседневной активности больных требуют углубленного анализа.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Хасанова Д.Р., Житкова Ю.В., Табиев И.И. Комплексная реабилитация пациентов с постинсультными синдромами. Медицинский совет. 2016; (8): 18–23. [Khasanova D.R., Zhitkova Y.V., Tabiev I.I. Integrated rehabilitation for patients with post-stroke syndrome. Medical advice. 2016; (8): 18–23. (in Russian)]
- Мищенко В.Н., Забродина Л.П. Нейропластичность и постинсультные когнитивные нарушения (терапевтические возможности). Международный неврологический журнал. 2020; 16(1): 42–49. [Mishchenko V.M., Zabrodina L.P. Neuroplasticity and post-stroke cognitive impairment (therapeutic possibilities). 2020; 16(1): 42–49. (in Russian)]. DOI: 10.22141/2224-0713.16.1.2020.197330
- Левин О.С., Боголепова А.Н. Когнитивная реабилитация пациентов с нейродегенеративными заболеваниями. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2020. 120(5): 110–115. [Levin O.S., Bogolepova A.N. Cognitive rehabilitation of patients with neurodegenerative diseases. Zh. Nevrol. Psikihiatr. Im. S.S. Korsakova. 2020. 120(5): 110–115. (in Russian)]. DOI: 10.17116/jnevro2020120051110
- Михайловская Т.В., Мишина И.Е., Точёнов М.Ю. Связь параметров артериальной гипертензии и ограничения жизнедеятельности в остром периоде ишемического инсульта. Вестник Ивановской медицинской академии. 2019; 24(3): 27–31. [Mikhailovskaya T.V., Mishina I.E., Tochyonov M.Yu. Connection of arterial hypertension parameters and vital activity limitation in acute period of ischemic stroke. Bulletin of the Ivanovo Medical Academy. 2019; 24(3): 27–31. (in Russian)]
- Мельникова Е.А., Разумов А.Н. Влияние нейропсихологических особенностей на восстановление больных с инсультом. Доктор.Ру. 2017; (11): 9–12. [Melnikova E.A., Razumov A.N. Influence of neuropsychological features on the recovery of patients with stroke. Doctor.Ru. 2017; (11): 9–12. (in Russian)]
- Sevcenko K., Lindgren I. The effects of virtual reality training in stroke and Parkinson's disease rehabilitation: a systematic review and a perspective on usability. Eur. Rev. Aging Phys. Act. 2022; 19(1): 4. DOI: 10.1186/s11556-022-00283-3
- Новикова Л.Б., Акопян А.П., Ахметова А.Р. Роль реабилитационного потенциала в восстановительном периоде инсульта. Consilium Medicum. 2017; 19(2-1): 14–16. [Novikova L.B., Akopian A.P., Akhmetova A.R. The role of rehabilitation potential in the restorative period of the stroke. Consilium Medicum. 2017; 19(2-1): 14–16. (in Russian)]
- Дамулин И.В., Екушева Е.В. Клиническое значение феномена нейропластичности при ишемическом инсульте. Анналы клинической и экспериментальной неврологии. 2016; 10(1): 57–63. [Damulin I.V., Ekusheva E.V. A clinical value of neuroplasticity in ischemic stroke. Annals of clinical and experimental neurology. 2016; 10(1): 57–63. (in Russian)]
- Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.; 1966. 349 с. [Bernstein N.A. Essays on the physiology of movements and the physiology of activity. Moscow; 1966. 349 p. (in Russian)]
- Даминов В.Д. Роботизированная механотерапия в нейро-реабилитации. Вестник Алматинского государственного института усовершенствования врачей. 2013; (S3): 83–88. [Daminov V.D. Robotic mechanotherapy in neurorehabilitation. Bulletin of the Almaty State Institute for the Improvement of Doctors. 2013; (S3): 83–88. (in Russian)]
- Гроховский С.С., Кубряк О.В. К вопросу о «дозе» двигательной реабилитации после инсульта: обзор. Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2018; 17(2): 66–71. [Grokhovskiy S.S., Kubryak O.V. Towards the question of "dose" motor rehabilitation after stroke: review. Physiotherapy, balneology and rehabilitation. 2018; 17(2): 66–71. (in Russian)]. DOI: 10.18821/1681-3456-2018-17-2-66-71
- Королева Е.С., Алифирова В.М., Латыпова А.В. и др. Принципы и опыт применения роботизированных реабилитационных

- технологий у пациентов после инсульта. Бюллетень сибирской медицины. 2019; 18(2): 223–233. [Koroleva E.S., Alifirova V.M., Latypova A.V. et al. Principles and global experience of applying robotic rehabilitation technologies in patients after stroke. Bulletin of Siberian Medicine. 2019; 18(2): 223–233. (in Russian)]. DOI: 10.20538/1682-0363-2019-2-223-233
13. Раваева М.Ю., Моисеенко В.А. Нарушение координации движений. Роль тренировок с биологической обратной связью в реабилитации. Вопросы устойчивого развития общества. 2020; (2): 601–608. [Ravaeva M.Yu., Moiseenko V.A. Lack of coordination of movements. The role of biofeedback training in rehabilitation. Issues of sustainable development of society. 2020; (2): 601–608. (in Russian)] DOI: 10.34755/IROK.2020.86.64.089
 14. Özen Ö., Buetler K.A., Marchal-Crespo L. Towards functional robotic training: motor learning of dynamic tasks is enhanced by haptic rendering but hampered by arm weight support. J. Neuroeng. Rehabil. 2022; 19(1): 19. DOI: 10.1186/s12984-022-00993-w
 15. Frisoli A., Barsotti M., Sotgiu E. et al. A randomized clinical control study on the efficacy of three-dimensional upper limb robotic exoskeleton training in chronic stroke. J. Neuroeng. Rehabil. 2022; 19(1): 14. DOI: 10.1186/s12984-022-00991-y
 16. Kim D.H., Lee K.D., Bulea T.C. et al. Increasing motor cortex activation during grasping via novel robotic mirror hand therapy: a pilot fNIRS study. J. Neuroeng. Rehabil. 2022; 19(1): 8. DOI: 10.1186/s12984-022-00988-7
 17. Чуканова Е.И., Чуканова А.С. Хроническая ишемия мозга, нейропластичность, возможности терапии. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2017; (9): 102–107. [Chukanova E.I., Chukanova A.S. Chronic cerebral ischemia, neuroplasticity, possibilities of therapy. 2017; (9): 102–107. (in Russian)]. DOI: 10.14412/2074-2711-2017-2-102-107
 18. Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н. Роботизированные устройства в нейрореабилитации: состояние вопроса. Вестник восстановительной медицины. 2018; (2): 94–107. [Belova A.N., Borzikov V.V., Kuznetsov A.N., Rukina N.N. Robotic devices in neurorehabilitation: review. Herald of Restorative Medicine. 2018; (2): 94–107. (in Russian)]
 19. Екушева Е.В., Комазов А.А. Использование реабилитационной перчатки «Аника» пациентами после инсульта: возможности повышения функционального восстановления. Фарматека. 2019; (13): 30–33. [Ekusheva E.V., Komazov A.A. The use of the "Anika" rehabilitation glove in stroke: the potentials for the improvement of functional recovery. Farmateka. 2019; (13): 30–33. (in Russian)]. DOI: 10.18565/pharmateca.2019.13.30-33
 20. Büsching I., Sehle A., Stürner J. et al. Using an upper extremity exoskeleton for semi-autonomous exercise during inpatient neurological rehabilitation — a pilot study. J. Neuroeng. Rehabil. 2018; 15(1): 72. DOI: 10.1186/s12984-018-0415-6
 21. Bos R.A., Haarman C.J., Stortelder T. et al. 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
 22. Cadilhac D.A., Andrew N.E., Kilkenny M.F. et al. Improving quality and outcomes of stroke care in hospitals: Protocol and statistical analysis plan for the Stroke123 implementation study. Int. J. Stroke. 2018; 13(1): 96–106. DOI: 10.1177/1747493017730741
 23. Gassert R., Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. J. Neuroeng. Rehabil. 2018; 15(1): 46. DOI: 10.1186/s12984-018-0383-x
 24. Baniqued P.D.E., Stanyer E.C., Awais M. et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review. J. Neuroeng. Rehabil. 2021; 18(1): 15. DOI: 10.1186/s12984-021-00820-8
 25. Germanotta M., Gower V., Papadopoulou D. et al. Reliability, validity and discriminant ability of a robotic device for finger training in patients with subacute stroke. J. Neuroeng. Rehabil. 2020; 17(1): 1. DOI: 10.1186/s12984-019-0634-5
 26. Brihmat N., Loubinoux I., Castel-Lacanal E. et al. Kinematic parameters obtained with the ArmeoSpring for upper-limb assessment after stroke: a reliability and learning effect study for guiding parameter use. J. Neuroeng. Rehabil. 2020; 17(1): 130. DOI: 10.1186/s12984-020-00759-2
 27. Varalta V., Picelli A., Fonte C. et al. Effects of contralesional robot-assisted hand training in patients with unilateral spatial neglect following stroke: a case series study. J. Neuroeng. Rehabil. 2014; 11: 160. DOI: 10.1186/1743-0003-11-160
 28. Пирадов М.А., Черникова Л.А., Супонева Н.А. и др. Перспективы развития роботизированных устройств для восстановления движений руки. Качество. Инновации. Образование. 2016; (S2): 122–130. [Piradov M.A., Chernikova L.A., Suponeva N.A. et al. Prospects of robotic technologies for upper limb rehabilitation. Quality. Innovation. Education. 2016; (S2): 122–130. (in Russian)] 

Поступила / Received: 25.06.2022

Принята к публикации / Accepted: 12.08.2022

Об авторах / About the authors

Бирюков Евгений Андреевич / Biryukov, E.A. — студент 6 курса лечебного факультета ФГБОУ ВО ИвГМА Минздрава России. 153012, Россия, г. Иваново, Шереметьевский просп., д. 8. eLIBRARY.RU SPIN: 6887-7432. <https://orcid.org/0000-0001-5379-3794>.

Ястребцева Ирина Петровна / Yastrebtsseva, I.P. — д. м. н., доцент, профессор кафедры неврологии и нейрохирургии ФГБОУ ВО ИвГМА Минздрава России. 153012, Россия, г. Иваново, Шереметьевский просп., д. 8. eLIBRARY.RU SPIN: 7458-6930. <https://orcid.org/0000-0002-3429-9640>. E-mail: ip.2007@mail.ru