УДК 004.5:004.8
DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0011

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ

© 2021

Трифонов Андрей Андреевич, аспирант
Юго-Западный государственный университет
(305040, Россия, Курск, ул. 50 лет Октября, 94,e-mail: voldraf@mail.ru)
Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук,
декан факультета прикладной математики и информатики
Московский государственный гуманитарно-экономический университет
(107150, Россия, Москва, Лосиноостровская,49, e-mail: petrunina@mggeu.ru)
Лазурина Людмила Петровна, доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Биологической и химической технологии»
Курский государственный медицинский университет
(305041, Россия, Курск, К. Маркса,3 e-mail: ku3bmin@gmail.com)

Аннотация. Современные методы нейровизуализации играют важную роль для эффективного использования роботизированных устройств внейрореабилитации и открывают путь для разработки новых решений, направленных на повышение терапевтической эффективности лечения. Эффективное использование реабилитационных роботов требует тщательно разработанного протокола реабилитации. Для достижения этой цели в последние десятилетия было проведено большое количество работ, направленных на исследования процессов обучения двигательным навыкам. Фундаментальным аспектом планирования роботизированной терапии, направленной на ускорение сенсомоторного восстановления, является четкое понимание того, как мозг управляет движениями, и какие механизмы применяются для обучения новым навыкам. В данной статье представлен анализ современных тенденций в области реабилитации постинсультных больных, рассмотрены методы и модели нейрореабилитации. Проведен анализ мультимодальных оценок механизмов реабилитации, дающих возможность контролировать эффективность применения протокола роботизированной реабилитации на основе клинических шкал. Проведенный анализ показал, что в настоящее время в реабилитации нижних конечностей постинсультных больных широко используются экзоскелеты с программным управлением, и актуальной является проблема разработки биотехнической системы нейрофизиологической реабилитации с роботизированным устройством, позволяющей повысить эффективность реабилитации постинсультных больных посредством адаптации алгоритма управления робототехническим устройством к текущего функциональному состоянию пациента.

Ключевые слова: роботизированная нейрореабилитация, модели нейрореабилитации, методы нейровизуализации, интерфейс мозг-компьютер, экзоскелеты.

CONTEMPORARY TENDENCES OF THE ROBOT-ASSISTED NEUROREHABILITATION

© 2021

Trifonov Andrej Andreevich, post-graduate student
Southwest State University
(305040, Russia, Kursk,50 Let Oktyabrya Street, 94,e-mail: voldraf@mail.ru)
Petrunina Elena Valerievna, candidate of technical sciences, dean of facuilty of applied mathematics and informatics
Moscow State University of Humanities and Economics
(107150, Russia, Moscow, Losinistrovskaya Str. 49, e-mail: petrunina@mggeu.ru)
Lazurina Lyudmila Petrovna, doctor of biological sciences,associate professor,
head of the department of "Biological and Chemical Technology"
Kursk State Medical University
(305041, Russia, Kursk, Karl Marx street No.3,e-mail: ku3bmin@gmail.com)

Abstract. State-of-the-art methods of neurovisualization are instrumental for the efficient application of roboticdevices in neurorehabilitation. They pave the way for the development of further roboticsolutionsaiming to enhance the effectiveness of therapeutic treatments. A thoroughly developed rehabilitation training protocol is imperative forthe effective application of robots in patient care. In recent decades, a tremendous number of studies have been conducted in order to achieve this objective. They were aimed at gaining a full understanding of motor learning processes. An insight into both the way the brain controls movements and the mechanisms which are applied to learning new skills are considered to be fundamental aspects of rehabilitation therapy planning. This article examines current trends in the field of rehabilitation of post-stroke patients and highlights methods and models of neurorehabilitation based on noninvasive methods of neurovisualization. An exhaustive analysis of multimodal assessments of the rehabilitation mechanisms' efficiency was performed. It enabled the estimation of changes in brain activity before/after and during the application of the robot-assisted rehabilitation protocol based on clinical scales. According to the analysis performed, software-assisted exoskeletons are recognized as the most widespread technologies for rehabilitation of the lower extremities of

post-stroke patients.

Keywords: robot-assisted neurorehabilitation, neurorehabilitation methods, neurovisualization methods, computer-brain interface, exoskeletons.

Введение. Роботизированные тренировки играют ключевую роль в нейрореабилитации перенесших инсульт лиц. Робототехническую систему можно запрограммировать и обучать на основе парадигм моторного обучения и управления мозгом. Кроме того, роботы способны воспроизводить точные движения конечностей с учетом сил и моментов на основании, биоинформации о характеристиках движения. Более того, очевидно, что поведенческий результат реабилитационного лечения не позволяет составить четкую картину сложного механизма нейропластических изменений, влияющих на выздоровление, поэтому для характеристики нейронных коррелятов используются современные методы нейровизуализации. Последние исследования подтверждают эффективность применения роботизированных устройств в сфере нейрореабилитации и открывают пути для разработки новых решений в данной области [1 – 4].

Эффективное использование реабилитационных роботов для ухода за пациентами требует тщательно проработанного протокола реабилитации. Для достижения этой цели в последние десятилетия было проведено большое количество исследований процессов обучения двигательным навыкам. Фундаментальным аспектом планирования роботизированной терапии, направленной на ускорение сенсомоторного восстановления, является изучение процесса управления движением, а также изучение механизмов формирования новых двигательных навыков. В данном контексте решающую роль играет разработка наиболее подходящей и эффективной стратегии контроля, эта **цель** может быть достигнута путем использования последних достижений в области нейробиологии человека.

Материалы и результаты исследования. *Методы и модели нейрореабилитации.* В результате проведенных исследований в области физиологии человека, биомеханики и управления были сформулированы теоретические основы формирования и генерации процесса движения. Первый нейробиологический результат использования сенсомоторной нейрореабилитации основывался на влиянии двигательной активности на процесс моторного обучения. Другие исследователи пытались пойти дальше, ранжируя вариативность в зависимости от ее влияния на процесс выполнения задачи, и пришли к заключению, что различная степень вариабельности по-разному влияет на процесс обучения, если применяется в различных пространствах динамического многообразия [5].

Следующий нейробиологический результат, на который стоит обратить внимание, связан с наблюдением пациента за действием – виртуальной реальностью (*VR*). Было продемонстрировано, что визуальная обратная связь, полученная в процессе наблюдении за действием, выполняемым другим человеком, способствует улучшению моторного обучения. Маттар и Гриббл показали, что эффективность реабилитационных тренингов у пациентов, которые первоначально просмотрели видео с образцами движений значительно выше, чем у пациентов, которые не просматривали ни одного видео. В качестве возможного объяснения авторы предположили, что наблюдение за действиями может быть связано с приобретением нейронного представления динамики задачи, что также подтвердилось другими экспериментами. Таким образом, разумно полагать, что интеграция этапов наблюдения за действиями в программу роботизированной нейрореабилитации может привести к большему эффекту.

Эти выводы дали стимул развитию методики совместного наблюдения за действиями и пассивное проприоцептивное обучение, что дало основания для обсуждения роли проприоцептивного обучения (или, в более общем смысле, сенсорного обучения) в процессе восстановления. Сенсорное обучение тесно связано с моторным обучением, так как моторное обучение формирует сенсорные сети в головном мозге, а сенсорное обучение изменяет моторные области. В частности, сенсорное обучение приводит к изменениям в моторных сетях в головном мозге, что связано с пластичностью сенсорных систем, которая определяется афферентными сигналами с периферии и корковыми проекциями из моторных областей.

Несмотря на широкий фронт исследований, до сих пор не подтверждена возможность получения информации о механизмах, задействованных мозгом в процессе сенсомоторного восстановления. Новыми инструментами для решения этой проблемы могут послужить модели, относящиеся к области компьютерной нейрореабилитации. Парадигма компьютерной нейрореабилитации состоит из математического моделирования механизмов, лежащих в основе процесса реабилитации, с целью изучения биологических деталей восстановления и оптимизации индивидуального лечения пациентов. Каждая модель характеризуется тремя характеристиками: (1) использование в качестве входных данных количественного описания сенсомоторной активности, полученное с помощью моделирования или взаимодействия с роботами; (2) модель основана на описании вычислительных механизмов активности – зависимой пластичности; (3) получение количественных значений показателей функционирования. Некоторые варианты таких моделей были разработаны для конкретных случаев, однако, их можно адаптировать к роботизированной нейрореабилитации для лечения пациентов [6, 7].

Несмотря на это, необходимо также учитывать возможность мозга автономно выбирать определенную стратегию управления моторикой для выполнения задачи. Например, при обучении стабилизации можно выбрать либо стратегию, которая больше полагается на управление с обратной связью, либо стратегию, ос-

нованную на жестком управлении [5]. Следовательно, изучение и моделирование стратегий и механизмов переключения между ними позволит более эффективно прогнозировать результаты применения конкретной стратегии. Использование интегрированных моделей сенсомоторного контроля во время роботизированной нейрореабилитации позволит создать роботов, полностью адаптированных к уровню поражения пациента и подстраивающихся к его движениям.

Интерфейсы мозг-компьютер (ИМК) изначально задумывались как неинвазивные устройства, обеспечивающие связь, в то время как их инвазивные аналоги, часто определяемые как интерфейсы мозг-машина (ИМТ), были нацелены на обеспечение определенного уровня моторного контроля у полностью парализованных или серьезно ослабленных людей. Учитывая их способность изменять и формировать пластичность нейронов, в последнее время ИМК и ИМТ стали использоваться в нейрореабилитации лиц с двигательными нарушениями часто в сочетании с другими терапевтическими подходами, включая манипуляторы или экзоскелеты [6, 7]. Например, в недавнем исследовании группа Миллана показала, что использование функциональной электростимуляции (ФЭС) на основе ИМК могло обеспечить значительное функциональное восстановление у пациентов с инсультом, причем эффект сохранялся через 6 – 12 месяцев после окончание терапии [6]. В этом исследовании использование ИМК для определения намерения движения запускало активацию мышц рук посредством ФЭС, было показано, что восстановление моторики сопровождалось значительной реорганизацией коры.

В другом исследовании группа Контрерас-Видаля изучала ходьбу человека по беговой дорожке с контролем ходящего аватара с помощью ИМК и без него, а также с помощью локализации источника данных ЭЭГ. Авторы показали, что использование ИМК приводит к активации коры головного мозга, в отличие от тренингов без ИМК, что свидетельствует о потенциальной пользе терапии на основе ИМК для стимулирования коркового взаимодействия во время реабилитации

Недавно группы Рамос-Мургиалдай и Кармена разработали новый «гибридный» ИМТ, в котором внутрикортикальные сигналы и ЭМГ использовались для управления роботизированным экзоскелетом верхней конечности с несколькими степенями свободы у пациента с тяжелым хроническим инсультом. Было показано, что реабилитация с помощью этой системы позволила достичь значительного восстановления моторики, которое сохранялось через 6 месяцев [7].

Эти примеры показывают, что ИМК и ИМТ могут быть успешно использованы для повышения эффективности нейрореабилитации за счет более сильных кортикальных изменений, что открывает пути для разработки новых комбинированных и персонализированных стратегий реабилитации, в которых декодирование мозговой активности по замкнутому циклу играет ключевую роль для максимального сенсомоторного восстановления.

Мультимодальная оценка восстановления. В дополнение к кинематическому и кинетическому мониторингу реабилитационных тренингов также необходимо оценить результаты протокола нейрореабилитации. Обеспечение надежной оценки сенсомоторных компонентов важно для оптимизации шансов пациента на выздоровление. Несмотря на это количественные оценки реабилитации с помощью роботизированных устройств не всегда выполняются в клинической практике. Более того, незначительные сенсорные и моторные аномалии практически не обнаруживаются клиническими измерениями. В этом контексте реабилитационная робототехника также может повысить клиническую оценку благодаря добавлению количественных показателей.

Многие работы в области нейрореабилитации с использованием роботизированных решений не учитывали полную характеристику активности мозга. На сегодняшний день уже проведены некоторые исследования в данном направлении, однако необходимо охарактеризовать нейронную основу восстановления сенсомоторной функции, управляемой новыми роботизированными устройствами. Особое внимание необходимо сфокусировать на изучении процесса формирования структурных и функциональных свойств мозга в ходе выполнения программы реабилитации. Фактически, характеристика реорганизации мозга в сочетании с адекватной оценкой поведенческих характеристик позволит провести количественную оценку процессов реабилитации, управляемых роботом.

Текущая клиническая процедура оценки двигательных аномалий в основном представлена качественными оценками, выполняемыми операторами-специалистами с использованием клинических шкал. Применение этих шкал состоит из предложения пациентам серии заданий, тестов и анкет, а также процесса наблюдения за их выполнением и оценивания результатов.

Разработанные клинические шкалы можно разделить на шкалы для измерения двигательной активности и шкалы для оценки сенсорных функций. Среди первой группы наиболее широко используются: «Тест качества навыков верхних конечностей (*QUEST*)» для оценки моделей движений и функции рук [8], «Модифицированная шкала Ашворта (*MAS*)» для измерения степени спастичности верхних конечностей на основе сопротивления мышц пассивным растяжениям [9], «Оценка Фугля-Мейера (*FMA*)» для количественного измерения сенсомоторных нарушений [10], «Оценка односторонней функции верхних конечностей Мельбурна (*MAUULF*)» для оценки качества движений [11] и, наконец, «*Тест «Box and Block Test*» (*BTB*)» для оценки степени ловкости рук [12]. Кроме того, клинические рейтинговые шкалы, утвержденные и в основном используемые для измерения сенсорных функций, – это «*Nottingham Sensory Assessment*» [13] или «*Rivermead Assessment of Somatosensory Performance*» [14] и тест «*Joint Position Matching* (*JPM*)» [15], пред-

назначенный для измерения остроты восприятия позиции порога обнаружения пассивного движения (*TTDPM*) для тестирования кинестезии [16], и тест камертона для измерения чувствительности к вибрации [17].

Все вышеупомянутые сенсорные клинические шкалы применяются также и к нижним конечностям. Другие шкалы, используемые для нижней конечности, - это тест «пять раз сесть, чтобы встать» [18], тест «встань и иди» (*TUG*) [19], тест на двухминутную ходьбу и тест на ходьбу на десять метров [20]. Для проверки способности контролировать равновесие при спокойном стоянии наиболее распространенными клиническими шкалами являются тест Ромберга и шкала баланса Берга [5]. Несмотря на то, что такие шкалы широко приняты и признаны во всем мире и фактически обеспечивают важные измерения сенсомоторной функции пациентов, они в основном качественные и имеют низкое разрешение. По этой причине они могут оказаться субъективными и трудно воспроизводимыми и, следовательно, не подходят для обеспечения точных и надежных измерений. Ограничением к применению этих тестов является дефицит объективных технологий измерения во многих клинических условиях. Известно, что широко используемые инструменты, такие как ручные гониометры, не обладают чувствительностью и надежностью.

Учитывая низкое разрешение таких шкал, большинство пациентов получает приблизительный балл, не всегда адекватно характеризующий их состояние; кроме того, значения, которые располагаются ниже порога чувствительности шкалы, остаются невидимыми, что не позволяет отследить динамику процесса. Другой недостаток заключается в том, что многие операторы считают процесс администрирования весов слишком сложным и трудоемким.

Последние достижения в области тактильных интерфейсов, предназначенных для сенсомоторной реабилитации, послужили толчком к разработке инновационной роботизированной оценки. На самом деле такая технология представляет систему измерений, которая позволяет точно и непрерывно измерять положения, скорости и силы суставов, контролировать их кинематические и кинетические параметры, а также обеспечивать надежную процедуру сбора больших наборов нормативных данных с высоким разрешением. Роботизированные устройства способны непрерывно контролировать процесс лечения, обеспечивая онлайн-оценку непрямых движений, сокращая время администрирования и обеспечивая немедленную обратную связь. Мониторинг в реальном времени может не только значительно сократить время, необходимое для оценки двигательных улучшений пациентов, но также стать важным преимуществом процесса нейрореабилитации с помощью роботов.

В последнее время появились новые способы оценки энергопотребления и психологического состояния человека путем подключения датчиков роботов и внешних устройств. Хорошо известно, что неврологические заболевания, влияющие на походку, увеличивают расход энергии до 70% по отношению к здоровым людям. Эта количественная оценка получена с помощью непрямой калориметрии с использованием экзоскелета. Кроме того, в стадии разработки находятся новые методы оценки, использующие возможности роботов. Что касается возможности оценки психологического состояния, то в этой области также проводятся исследования по взаимодействию, поскольку такая оценка может иметь решающее значение для количественного мониторинга уровня вовлеченности и мотивации пациентов. Для этого с помощью внешних устройств измеряются вариабельность сердечного ритма, частота дыхания, реакция проводимости кожи и температура кожи с последующим сопоставлением этих показателей с кинематической и динамической информацией, поступающей от робота [5].

Роботизированные средства нейрореабилитации позволяют улучшить качество оценки, что важно для изучения влияния реабилитационного лечения на сенсомоторные функции. Роботизированные измерения могут потенциально превзойти субъективные клинические оценки, их точность ограничена только техническими характеристиками датчиков.

Сенсомоторную работу также можно оценить с помощью записей активности мозга или мышц. Фактически, учитывая сложность функциональной реорганизации мозга в ответ на заболевания центральной нервной системы, крайне важно изучить активность мозга в высоком временном (порядка миллисекунд) и пространственном (порядка 1 см или меньше) разрешениях. Таким образом, объединение этих двух шкал увеличивает возможность понимания процесса реабилитации. Высоких разрешений можно достичь путем комбинации записей электроэнцефалографии высокой плотности (*HDEEG*) и методов визуализации источников, что позволяет надежно реконструировать сети состояния покоя мозга, а также измерить электрофизиологическую подкорковую активность. Кроме того, *HDEEG* недорога и портативна по сравнению с другими неинвазивными методами нейровизуализации, такими как магнитоэнцефалография (МЭГ) или функциональная и структурная магнитно-резонансная томография (МРТ).

В дополнение к общему исследованию деятельности, связанной с выполнением задач важно также оценить функциональную связность, как во время выполнения двигательных заданий, так и в состоянии покоя. Функциональная связность представляет собой значимую статистическую взаимосвязь между отдельными областями мозга, и любой дисбаланс, возникающий в свойствах функциональной связности, может лежать в основе нейропатологических процессов и нарушений. Более того, функциональная связность во время спонтанной колебательной активности, измеряемой другими методами, например, такими как функциональная МРТ в состоянии покоя, изменяется после проприоцептивной тренировки с роботизированным манипулятором. Кроме того, функциональная связность

предсказывает поведенческие результаты реабилитационных протоколов, восстановление двигательной функции у пациентов с инсультом, а также коррелирует с уровнем клинической инвалидности у пациентов с ранним ремитирующим рассеянным склерозом. Таким образом, оценка функциональной связности до и после реабилитации является ценным инструментом для оценки эффективности протокола реабилитации, с использованием роботизированного устройства [5].

Степень сенсомоторного восстановления также можно оценить с помощью других электрофизиологических измерений, таких как ЭМГ. Многие заболевания, влияющие на сенсомоторную систему человека, связаны с аномальными паттернами мышечной активации и, таким образом, восстановление моторики может быть непосредственно измерено с помощью паттернов ЭМГ. В этом контексте мышечная активность обычно раскладывается на инвариантные модули пространственной и временной активации. Аномальная синергия мышц по отношению к их здоровым аналогам может, например, быть информативной для компенсаторных стратегий, которые обычно отражают природу и уровень нарушения.

До сих пор многодоменные оценки не проводились постоянно, и оригинальное роботизированное решение должно сопровождаться валидационными исследованиями того, как реабилитационный робот влияет на функциональное состояние (ФС) пациентов, оценивая в то же время изменения нейронных и поведенческих коррелятов и их взаимодействие. Следовательно, объединение этих оценок может повысить чувствительность, выделить потенциальные дезадаптивные компенсаторные стратегии, спланировать индивидуальное терапевтическое вмешательство и более точно отслеживать прогрессирование заболевания. Эти исследования потенциально могут открыть новые представления о функциях мозга и об эффективности конкретной реабилитационной программы и устройства. Например, в области реабилитации походки для субъектов, страдающих рассеянным склерозом, эффективность тренировок с помощью роботов для восстановления опорно-двигательной функции все еще обсуждается. Однако, используя описанную выше мультимодальную структуру, можно добиться дальнейшего повышения эффективности использования роботизированных устройств в реабилитации постинсультных больных.

Наконец, нейрофизиологические и клинические факторы, влияющие на восстановление сенсомоторной функции пациента, должны управлять процессом реабилитации робототехнического устройства. В этом контексте сочетание мультимодальных подходов позволит улучшить понимания этих важнейших факторов. Например, электрофизиологические записи с мышц человека могут служить в качестве управляющих сигналов для роботизированных реабилитационных устройств, тем самым отводя ЭМГ двойную роль: формирование объема реабилитационного вмешательства и биологическую обратную связь выполняемого движения [5].

В перспективе должны быть разработаны вычислительные модели механизмов восстановления, прогнозирования использования различных стратегий управления моторикой и, в конечном итоге, адаптации плана лечения к пациенту.

Заключение. Проведенный анализ современных исследований в области реабилитации постинсультных больных показал, что в настоящее время в реабилитации нижних конечностей постинсультных больных широко используются экзоскелеты с программным управлением. Однако в большинстве робототехнических устройств, предназначенных для реабилитации пациента, отсутствуют средства адаптации программы реабилитации как к общему функциональному состоянию пациента, так и к функциональному состоянию реабилитируемой конечности. Более того, в программах реабилитации не предусматривается контроль текущей динамики эффективности процесса реабилитации. В этой связи показана актуальность разработки биотехнической системы нейрофизиологической реабилитации с роботизированным устройством, управляемым посредством дешифрированных электромиосигналов и позволяющей повысить эффективность реабилитации постинсультных больных посредством адаптации алгоритма управления робототехническим устройством к текущему функциональному состоянию пациента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трифонов, А.А. Реабилитационная биотехническая система с электромиографическим контуром управления / А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, М.Б. Мяснянкин, С.А. Филист // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ'2020: труды XIV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (01-03 июля 2020 г.). – Владимир-Суздаль, 2020. – С. 128-133.

2. Trifonov, A. Human–Machine Interface of Rehabilitation Exoskeletons with Redundant Electromyographic Channels /A. Trifonov, S. Filist , S. Degtyarev, V. Serebrovsky , and O. Shatalova//Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” ER(ZR) 2020, Ufa, Russia, 15–18 April 2020. – P. 237-247.

3. Трифонов, А.А. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А.А. Трифонов, Е.В. Петрунина, С.А. Филист, А.А. Кузьмин, В.В. Жилин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т. 9. – №4(33). – С. 49-66.

4. Трифонов, А.А. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета/ А.А. Трифонов, С.А. Филист, А.А. Кузьмин, В.В. Жилин, Е.В. Петрунина//Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, № 4 (52), 2020. - С.99-111.

5. Frolov, A.A. Use of robotic devices in post-stroke rehabilitation / A.A. Frolov, E.V. Biryukova, P.D. Bobrov, I.B. Kozlovskaya // Neuroscience and behavioral physiology. – 2018. – Vol. 48, No. 9. – P. 1053 – 1066.

6. Biasiucci, A. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke / A. Biasiucci, R. Leeb, I. Iturrate, S. Perdikis, A. Al-Khodairy, T. Corbet, A. Schnider, T. Schmidlin, H. Zhang, M. Bassolino // Nat. Commun. – 2018. – No.9. – Pp. 2421.

7. Ramos-Murguialday, A.A novel implantable hybrid brain-machine-interface (BMI) for motor rehabilitation in stroke patients / A.A. Ramos-Murguialday, P. Khanna, A. Sarasola-sanz, N. Irastorza-Landa, J. Klein, J.H. Jung et al. // In Proceedings of

the 2019 9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (20–23 March 2019). – San Francisco, CA, USA, 2019.

8. DeMatteo, C. The reliability and validity of the Quality of Upper Extremity Skills Test / C. DeMatteo, M. Law, D. Russell, N. Pollock, P. Rosenbaum, S. Walter // Phys. Occup. Ther.Pediatr. – 1993. – No. 13. – Pp.1-18.

9. Bohannon, R.W. Interrater Reliability of a Modified Ashworth Scale of Muscle Spasticity / R.W. Bohannon, M.B. Smith // Phys. Ther. – 1987. – No.67. – Pp. 206-207.

10. Duncan, P.W. Reliability of the Fugl-Meyer Assessment of Sensorimotor Recovery Following Cerebrovascular Accident / P.W. Duncan, M. Propst, S.G. Nelson // Phys. Ther. – 1983. – No.63. – Pp. 1606-1610.

11. Randall, M. Reliability of the Melbourne Assessment of Unilateral Upper Limb Function / M. Randallzx, J.B. Carlin, P. Chondros, D. Reddihough // Dev. Med. Child Neurol. – 2001. – No.43. – Pp. 761-767.

12. Mathiowetz, V. Adult norms for the Box and Block Test of manual dexterity / V. Mathiowetz, G. Volland, N. Kashman, K. Weber // Am. J. Occup. Ther. – 1985. – No.39. – Pp. 386-391.

13. Lincoln, N. Reliability and revision of the Nottingham Sensory Assessment for stroke patients / N. Lincoln, J. Jackson, S. Adams. – 1998. – No.84. – Pp. 358-365.

14. Winward, C.E. The Rivermead Assessment of Somatosensory Performance (RASP): Standardization and reliability data / C.E. Winward, P.W. Halligan, D.T. Wade // Clin. Rehabil. – 2002. – No.16. – Pp. 523-533.

15. Lephart, S.M. Proprioception following anterior cruciate ligament reconstruction / S.M. Lephart, F.H. Fu, P.A. Borsa, C.D. Harner // J. Sport Rehabil. – 1992. – No.1. – Pp. 188-196.

16. Lephart, S.M. Proprioception of the shoulder joint in healthy, unstable, and surgically repaired shoulders / S.M. Lephart, J.J. Warner, P.A. Borsa, F.H. Fu // J. Shoulder Elb. Surg. – 1994. – No.3. – Pp. 371-380.

17. Gilman, S. Joint position sense and vibration sense: Anatomical organisation and assessment / S. Gilman // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. – 2002. – No. 73. – Pp. 473–477.

18. Mong, Y. 5-repetition sit-to-stand test in subjects with chronic stroke: Reliability and validity / Y. Mong, T.W. Teo, S.S. Ng // Arch. Phys. Med. Rehabil. – 2010. – No.91. – Pp. 407-413.

19. Podsiadlo, D. The timed "Up & Go": A test of basic functional mobility for frail elderly persons / D. Podsiadlo, S. Richardson // J. Am. Geriatr. Soc. – 1991. – No.39. – Pp. 142-148.

20. Watson, M.J. Refining the ten-metre walking test for use with neurologically impaired people / M.J. Watson // Physiotherapy. – 2002. – No. 88. – Pp. 386–397.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90112.

Статья поступила в редакцию 29.07.2021
Статья принята к публикации 15.09.2021