

**УДК 612.763**

## **ДВИГАТЕЛЬНАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕНИЯМИ МОТОРИКИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ: АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**

*Чуян Е. Н.<sup>1</sup>, Бирюкова Е. А.<sup>1</sup>, Бабанов Н. Д.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия*

<sup>2</sup>*ФГБУН «НИИ Нормальной физиологии имени П.К. Анохина», Москва, Россия*

*E-mail: biotema@mail.ru*

Статья посвящена анализу современного состояния исследований в области двигательной реабилитации пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей. Наличие большого числа современных публикаций, посвященных восстановлению двигательных функций путем стимулирования естественных механизмов пластичности мозга, свидетельствует о передовом характере исследований, направленных на развитие новых технологий и методов медицинской реабилитации пациентов с неврологической патологией, в том числе и нарушением моторики верхних конечностей. При этом в научной литературе отмечают два основных аспекта: положительный эффект использования роботизированных систем с БОС в практике постинсультной реабилитации и второй, который состоит в том, что прогресс в разработке более совершенных систем и технологий их применения упирается в недостаточное понимание принципов управления движением со стороны центральной нервной системы. Исследовательских усилий требует и обоснование двигательного режима, способов контроля процедур, уточнения и выбора надёжных маркёров состояний пациентов. Очевидно, для решения этих и других задач необходимо, с одной стороны, значительно расширить число регистрируемых параметров, характеризующих функциональное состояние испытуемых или пациентов в процессе выполнения моторной задачи в режиме БОС, а, с другой – разработать методические приемы, позволяющие судить о результатах воздействия.

**Ключевые слова:** биоуправление движением, биологическая обратная связь, двигательная нагрузка, стабилметрия, моторное обучение, функциональное состояние, нейрокомпьютерный интерфейс, нейрореабилитация, робототехнические системы.

В настоящее время физическая реабилитация пациентов с нарушениями моторных функций вышла на качественно новый уровень своего развития, что связано, в том числе, с развитием медицинской техники. Это обусловило значительный рост интереса к работам, связывающим моторное обучение, целенаправленную двигательную активность с нейропластичностью центральной нервной системы (ЦНС) [1, 2]. Значительное количество научных публикаций в области клинической неврологии посвящено комплексной реабилитации больных, перенесших инфаркт мозга различной тяжести и локализации [1–3]. Отметим, что степень разработанности биологических аспектов обеспечения моторных задач при организации целенаправленных движений, в том числе верхней конечности, по

нашему мнению, является недостаточной. Полагаем, что одним из основных вопросов при обсуждении эффективности различных подходов к двигательной реабилитации является возможность сравнения и сопоставления результатов разных исследований. Вместе с тем, анализ литературных данных отечественных и зарубежных авторов указывает на несопоставимость, а зачастую противоречивость и невоспроизводимость результатов исследований.

В связи с этим, целью настоящего исследования явился анализ современного состояния исследований в области двигательной реабилитации пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей.

На сегодняшний день основной причиной инвалидизации при неврологических патологиях является развитие целого ряда двигательных расстройств, в том числе и нарушение моторики верхних конечностей [4, 5].

Следует отметить, что в последние годы достигнуты значительные успехи в лечении неврологических заболеваний, и, в частности, коррекции двигательных функций верхней конечности [2, 5, 6]. Немаловажную роль в этом ученые отводят открытиям в области фундаментальных основ пластических процессов в моторной коре головного мозга при ее повреждениях. Нейрофизиологические и нейроанатомические исследования на животных, неинвазивные методы картирования мозга у человека продемонстрировали способность коры мозга к значительной функциональной перестройке. При этом согласно многочисленным экспериментальным и клиническим исследованиям, в активизации механизмов нейропластичности ЦНС важную роль играют различные методы восстановительной терапии [2]. Современные методы восстановления двигательных функций направлены, прежде всего, на стимулирование естественных механизмов пластичности мозга, компенсирующих его повреждения [7–10], а повторяющиеся активные целенаправленные движения способствуют восстановлению двигательных функций.

При этом, как было указано выше, анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной исследованиям в области двигательной реабилитации пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей, демонстрирует противоречивость и невоспроизводимость результатов исследований, что может быть связано с рядом факторов.

Во-первых, значительная часть исследований по применению гибридных технологий в комплексной реабилитации больных с нарушением моторных функций является клиническими, а потому носит в основном описательный характер, в то время как экспериментальный материал практически отсутствует. В ведущих мировых исследованиях рассматривается эффективность использования комплекса нейроинтерфейс "мозг-компьютер" (НМК) – системы, позволяющей осуществлять контроль за воображением движения на основе регистрации биоэлектрической активности мозга, возникающей при воображении целенаправленного движения, при управлении внешним роботизированным устройством (например, экзоскелетом руки, ортезом, средством передвижения и пр.). Имеются данные об успешной реабилитации больных с двигательными нарушениями в результате применения программно-аппаратного комплекса НМК и экзоскелета кисти (НМКЭ) [11–14].

При этом большинство исследований в клинике проведены с малыми выборками [11, 15, 16] или содержат лишь описания примеров клинических [16, 17].

Во-вторых, в подобных исследованиях обращают на себя внимание как большой разброс по тяжести заболевания (в том числе, степень выраженности пареза конечностей), так и различные восстановительные периоды после инсульта. В частности, в поздний восстановительный и резидуальный периоды инсульта у пациентов с умеренно выраженным парезом руки в результате комплексной реабилитации с использованием НМКЭ отмечено восстановление проксимальных, дистальных отделов руки, преимущественно в результате улучшения захвата кисти. У пациентов с грубыми парезами в эти восстановительные сроки включение НМКЭ в комплексную реабилитацию было менее эффективным [11].

Третьей причиной несопоставимости результатов исследования является использование различных роботизированных устройств и методик их применения в реабилитации. На передний план в этой области выходит применение так называемых "гибридных систем", основанных на использовании компьютерных робототехнических комплексов с применением биологической обратной связи (БОС) [18–21].

Для комплексной реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций верхних конечностей широко используются устройства роботизированной механотерапии, предполагающей выполнение физических упражнений для развития движений в отдельных суставах поражённой конечности [22].

Можно привести следующие примеры экзоскелетов, применяющихся для реабилитации: ARM-Guide (Assistant Rehabilitation and Measurement Guide), который обеспечивает движения в локтевом и плечевом суставах [23]; MIME (Mirror Image Movement Enabler), управляющий движением предплечья и кисти по сигналам от здоровой руки [24]; BI Manu Track, обеспечивающий сгибание-разгибание кисти и пронацию-супинацию предплечья обеих рук [25]; Ne Robot (Neuro Rehabilitation Robot), стимулирующий движения в плечевом и локтевом суставах [26]; Haptic Master, исправляющий отклонения от "неправильных" движений [27]; T-WREX (Therapy Wilmington Robotic Exoskeleton), блокирующий "ненужные" для различных лечебных упражнений степени подвижности поврежденной конечности [28, 29].

Все устройства роботизированной механотерапии по принципу действия можно разделить на пассивные и активные.

Механотерапевтическими аппаратами пассивного действия являются устройства, обеспечивающие движение строго в одном направлении при обязательной фиксации сегментов конечностей. Их основной задачей является увеличение подвижности в изолированном суставе за счет дозированного растяжения параартикулярных тканей, при условии мышечного расслабления [30, 31]. Пассивными, например, являются простейшие ортезы [30], позволяющие совершать разгрузку веса, либо ограничивать движение сустава по определённым направлениям во время постоперационной реабилитации. В качестве примера таких устройств можно привести экзоскелет руки WREX (Wilmington Robotic Exoskeleton) [32], который основан на комбинации противовесов и линейных пружин. Для перемещения руки, человеку необходимо совершить небольшое усилие, так как комплекс снимает большую часть нагрузки.

Однако, на сегодняшний день особый интерес вызывает применение робототехнических устройств активного действия (в том числе и для восстановления управляемости рук), отличающихся способностью по принципу биологической обратной связи (БОС) изменять характер своей работы. Применение таких устройств стало возможно благодаря тому, они основываются на применении "гибридных технологий", основанных на связи показаний показаниях, встроенных в экзоскелет датчиков и микропроцессорных устройств, и биологических сигналов, зарегистрированных непосредственно у пациента. К ним относится широкий спектр экзоскелетов, которые на сегодняшний день с успехом применяются в клинической практике в качестве методов роботизированной механотерапии [11] для реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций вследствие, например, острого нарушения мозгового кровообращения [5, 6, 11].

Некоторые авторы [6] отмечают высокую эффективность применения систем, сочетающих технологии экзоскелета с технологией интерфейс "мозг-компьютер" (ИМК), основанной на анализе ЭЭГ сигналов для двигательной реабилитации. Практически этот подход реализован в таких методах, как тренировка в условиях виртуальной реальности, когда пациенты обучаются движениям по обратной связи [33, 34], и тренировка в условиях облегчения роботом [35, 36]. Этот подход основан на способности пациента совершать активные движения больной рукой или ногой и, следовательно, требует частичного сохранения двигательных функций. Если эти функции не сохранились, то перспективным методом стимулирования пластичности мозга остается только воображение движений.

Как показано во многих исследованиях [37, 38], воображение движений подчиняется тем же принципам, что и управление реальными движениями, и поэтому может стимулировать те же пластические механизмы [39].

Экзоскелеты часто сопрягают с компьютерной игрой, в которой курсор отражает движение джойстика в руке пациента, а пациент с помощью зрительной обратной связи может решать задачи компьютерных игр. В суставах некоторых экзоскелетов применяется пассивный пружинный механизм, обеспечивающий регулируемую разгрузку тренируемой руки, что позволяет пациенту двигать рукой с минимальными усилиями в суставах, в других экзоскелетах применяется активное управление суставами. Некоторые методы реабилитации предусматривают формирование необходимого движения в ходе компьютерной игры с настраиваемыми параметрами, в других же методиках врач выполняет движения пассивной рукой пациента, эти движения регистрируются, а затем воспроизводятся с помощью экзоскелета.

Важной частью подобных устройств является обеспечение БОС [12], своеобразная "гибридизация" живых и технических структур [14]. БОС при этом используется в качестве дополнительного канала информации о результативности выполнения заданной двигательной задачи [40]. Во время проведения процедуры, человеку предоставляется информация о внутренних физиологических показателях его состояния, тем самым испытуемый может менять стратегию своего поведения. Такие технологии уже показали высокую эффективность в вопросах качественной оценки реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций вследствие острого нарушения мозгового кровообращения [3–6].

Одним из примеров применения БОС в робототехнических устройствах активного действия является использование электромиографического (ЭМГ) сигнала, однако, остаются проблемы, связанные с его управлением [41]. Ряд работ отмечает перспективность в качестве альтернативы ЭМГ использования так называемой "силовой миографии" (Force myography; СМГ) [42, 43]. Отмечается, что такая система является эффективным методом в обеспечении биологической обратной связи в задачах, связанных с мелкой моторикой рук [43]. Метод показал высокую эффективность при использовании на здоровых пациентах, однако, в связи с техническими особенностями его применения, сильно ограничен для использования в реабилитации.

Несмотря на то, что БОС с использованием ЭМГ является одной из самых популярных как в России [44], так и за рубежом [45], данный метод не исчерпал своих возможностей в вопросах качественной оценки и описания получаемой информации, а также в создании новых методик для клинических исследований.

Значительно различаются и применяемые в исследованиях ИМК. Основные из них использует два вида активности мозга: электрофизиологическую (обусловлена электрохимическими процессами, связанными с передачей информации между нейронами мозга и регистрируется в электро- (ЭЭГ) и магнитоэнцефалографии (МЭГ)) и гемодинамическую (обусловлена увеличением скорости доставки кислорода к активным областям мозга по сравнению с неактивными, регистрируется с помощью функциональной магниторезонансной томографии или околоинфракрасной спектроскопии). В отличие от методов регистрации электрофизиологической активности, гемодинамические методы только косвенно отражают изменения активности нейронов в связи с выполняемой ментальной задачей. Поэтому наибольшее число исследований касается использования электрических сигналов. Вместе с тем, для регистрации МЭГ требуются громоздкие и дорогостоящие устройства, что делает использование такой системы для реализации БОС в целях реабилитации затруднительным. То же касается использования гемодинамической активности. Некоторые авторы [46] отмечают перспективность метода транскраниальной магнитной стимуляции, как в диагностике, так и в восстановлении функций пораженных конечностей.

ИМК различаются также и по типу регистрируемых сигналов мозга, и по способам их преобразования в команды управления внешним устройством. Существуют ИМК не инвазивные, использующие в качестве сигнала потенциалы мозга, регистрируемые на поверхности головы (ЭЭГ) и инвазивные, основанные на использовании множественной активности отдельных нейронов, которая регистрируется с помощью системы микроэлектродов, вживляемых в ткань мозга. Следует заметить, что, несмотря на несомненные обнадеживающие результаты применения инвазивных ИМК, до их массового клинического применения еще довольно далеко. ИМК подразделяются также на градуальные и дискретные. В градуальном ИМК выучивается новая сенсомоторная координация, связывающая активность мозга с направлением движения к цели непрерывным преобразованием. В случае использования инвазивного ИМК, основанного на регистрации активности отдельных нейронов, задача управления курсором облегчается, так как имеется

исходная связь между активностью нейронов моторных областей коры мозга и желаемым направлением движения [47]. Использование градуальных инвазивных ИМК, основанных на регистрации активности отдельных нейронов, является типичным в экспериментах на обезьянах [48]. В отличие от градуальных, дискретные ИМК способны посылать внешнему техническому устройству только некоторый ограниченный набор команд. Примером бинарного ИМК является интерфейс, основанный на регистрации компонента вызванного потенциала R300, возникающего в ответ на неожиданный, редко предъявляемый значимый стимул, когда он появляется среди часто предъявляемых незначимых стимулов [49, 50]. Другой тип дискретного ИМК основан на распознавании пространственно-временных паттернов ЭЭГ, соответствующих различным типам ментальной деятельности. Идея подобного ИМК была впервые высказана в работе Millan J., Del R. et al. (1998) [51]. В большинстве работ в качестве пространственно-временного паттерна ЭЭГ исследуется пространственное распределение амплитуд различных ритмов ЭЭГ по поверхности головы, перестройка которых, как известно, отражает доминирование тех или иных когнитивных процессов. В настоящее время показана высокая эффективность ИМК, основанных на воображении движений [51-54]. Разделяют зрительное (испытуемый представляет зрительный образ собственного движения, рассматривая его от третьего лица) и кинестетическое воображение (испытуемый создает кинестетические ощущения движения. Показано, что кинестетическое воображение движений активизирует те же области мозга, что и реальное движение, в то время, как зрительное воображение – в основном зрительные отделы мозга [55, 56]. Представительства исполнительных органов довольно широко распределены по поверхности коры [57]. Поэтому воображение движений разных органов создает разное распределение активности по поверхности коры и, соответственно, разные пространственные паттерны ЭЭГ, что облегчает задачу классификатора ИМК. Так, точная локализация источника электрической активности мозга, наиболее значимого для функционирования ИМК, основанного на воображении движений рук, была проведена в работе Frolov A. A. et al. (2012) [58]. Многочисленные исследования позволили выделить паттерны активности мозга, характерные для совершения и воображения движений [53, 54], а также для выполнения ментальных задач другого типа [56, 57]. Таким образом, представленные в современной литературе различия регистрируемых сигналов мозга, способов их преобразования в команды управления внешним устройством также не дают возможности в полной мере сопоставить результаты исследования.

В настоящее время как в России, так и за рубежом высокую эффективность показало применение стабилметрических методик оценки и коррекции функционального состояния пациентов с нарушениями моторных функций. Силовые платформы широко применяются и для спортивных исследований [58-60] и клинических исследований, в частности для анализа динамики восстановительного лечения пациентов с нарушением моторной функции [63], в диагностике и коррекции постурологических нарушений [60] и многих других областях. Искусственная обратная связь, организованная с помощью стабиллоплатформ, используется для решения различных задач биоуправления движением [59, 60], в том числе как

средство медицинской реабилитации [64]. Добавление биоуправления в структуру стабилометрической процедуры значительно расширяет возможности применения стабилоплатформ, предоставляя новые инструменты (для изучения как традиционных параметров позы, так и сенсорного обеспечения). При этом нерешенные задачи и возможные противоречия в трактовке результатов применения биоуправления (в том числе движением верхней конечности) по опорной реакции связаны с недостаточным развитием методологии, условиями реализации тренингов, параметрами обратной связи и другими.

Недостаточно исследованной проблемой остается также зависимость между числом необходимых повторений и общим объемом двигательной нагрузки, структурой нагрузки, выбором упражнений и достижением приемлемой функциональности конечности [60]. Анализ литературы указывает на то, что различия в общем объеме занятий для терапии в большей степени связаны с изменениями частоты и интенсивности упражнений, но при этом увеличение общего времени для реабилитации (объем занятий) соответствует лучшим результатам [65]. Имеются данные, что повторные курсы двигательной реабилитации, например, с применением экзоскелета кисти, позволяют достичь лучших результатов, чем единственный [60]. Иными словами, повышению функциональности конечности чаще соответствует больший объем тренировочных занятий, большее число повторений, выбор подходящего режима.

Во многих клинических исследованиях параметры дозирования двигательной нагрузки и число повторов упражнений не определены, хотя анализ данных указывает на положительную зависимость доза – реакция [66]. Однако другие авторы указывают на то, что длительная терапия оказывается нецелесообразной в первые несколько часов, дней или даже недель после инсульта [67]. Таким образом, при определении достаточного времени двигательной реабилитации вопрос дозирования действительно необходимого объема упражнений остается мало исследованным.

По нашему мнению, указанные факторы привели к несопоставимости, а зачастую и противоречивости результатов клинических и экспериментальных исследований в области восстановления двигательных функций конечности за счет стимулирования естественных механизмов пластичности мозга, компенсирующих его повреждения.

Таким образом, наличие большого числа современных публикаций, посвященных восстановлению двигательных функций путем стимулирования естественных механизмов пластичности мозга, свидетельствует о передовом характере данных исследований, направленных на развитие новых технологий и методов медицинской реабилитации пациентов с неврологической патологией, в том числе и нарушением моторики верхних конечностей. Необходимо отметить также, что большинство современных публикаций по данной проблеме имеет ярко выраженный прикладной характер описания реабилитационных мероприятий пациентов с двигательными нарушениями, а фундаментальные исследования, посвященные выявлению системных механизмов биоуправления движением в режиме БОС, все еще проводятся недостаточно. Следовательно, мы сталкиваемся с типичной научной ситуацией, когда применение на практике новых идей опережает понимание механизмов действия новых методов и технологий, лежащих в их

основе. При этом в научной литературе отмечают два основных аспекта: положительный эффект использования роботизированных систем с БОС в практике постинсультной реабилитации и второй, который состоит в том, что прогресс в разработке более совершенных систем и технологий их применения упирается в недостаточное понимание принципов управления движением со стороны ЦНС, что может иногда вызывать сомнения в эффективности этих технологий. Нет достаточной ясности и в вопросе о том, за счёт каких именно нейронных механизмов и при каких условиях (в том числе при каком режиме включения конечностей) лучше достигается цель двигательной реабилитации. Исследовательских усилий требует и обоснование двигательного режима, способов контроля процедур, уточнения и выбора надёжных маркёров состояний пациентов.

Очевидно, для решения этих и других задач необходимо, с одной стороны, значительно расширить число регистрируемых параметров, характеризующих функциональное состояние испытуемых или пациентов в процессе выполнения моторной задачи в режиме БОС, а, с другой – разработать методические приемы, позволяющие судить о результатах воздействия. Актуальной задачей является установление оптимальных режимов моторного обучения с учетом взаимосвязи эффективности выполнения и представления моторной задачи в режиме БОС-управления верхней конечностью с общим объемом и режимом двигательной нагрузки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, для решения этих и других задач необходимо, с одной стороны, значительно расширить число регистрируемых параметров, характеризующих функциональное состояние испытуемых или пациентов в процессе выполнения моторной задачи в режиме БОС, а, с другой – разработать методические приемы, позволяющие судить о результатах воздействия. Актуальной задачей является установление оптимальных режимов моторного обучения с учетом взаимосвязи эффективности выполнения и представления моторной задачи в режиме БОС-управления верхней конечностью с общим объемом и режимом двигательной нагрузки.

*Поддержано Грантом Государственного совета Республики Крым для молодых ученых на 2019 год. Руководитель Бирюкова Е. А*

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского».*

#### Список литературы

1. Daly J. J. Construction of efficacious gait and upper limb functional interventions based on brain plasticity evidence and model-based measures for stroke patients / J. J. Daly, R. L. Ruff // Scientific World Journal. – 2007. – Vol. 7. – P. 2031–2045.
2. Черникова Л. А. Пластичность мозга и современные реабилитационные технологии / Л. А. Черникова // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* – 2007. – Т. 1, № 2. – С. 40–47.
3. Bach Y. Theoretical and practical considerations in the restoration of function after stroke / Y. Bach, P. Rita // *Top Stroke Rehabilitation.* – 2001. – Vol. 8, No 3. – P. 1–15.

4. Королев А. А. Нейрореабилитация: современные технологии восстановительного лечения постинсультной спастичности / А. А. Королев, Г. А. Суслова // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – Вып. 7, часть 2. – С. 344–349.
5. Frolov A. A. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial / A. A. Frolov, O. Mokienko, R. Lyukmanov, E. Biryukova, S. Kotov, L. Turbina, G. Nadareyshvily, Y. Bushkova // *Frontiers in Neuroscience*. – 2017. – Vol. 11, No 400. – Published online. 2017 Jul 20. doi: 10.3389/fnins.2017.00400
6. Фролов А. А. Принципы нейрореабилитации, основанные на использовании интерфейса “Мозг-компьютер” и биологически адекватного управления экзоскелетом / А. А. Фролов, Е. В. Бирюкова, П. Д. Бобров, О. А. Мокиенко, А. К. Платонов, В. Е. Пряничников, Л. А. Черникова // *Физиология человека*. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 99–113.
7. Netz J. Reorganization of motor output in the non affected hemisphere after stroke / J. Netz, T. Lammers, V. Homberg // *Brain*. – 1997. – Vol. 120. – P. 1579.
8. Platz T. Multimodal EEG analysis in man suggests impairment\_specific changes in movement\_related electric brain activity after stroke / T. Platz, I.H. Kim, H. Pintschovius [et al.] // *Brain*. – 2000. – Vol. 123. – P. 2475.
9. Cramer S. C. Functional imaging in stroke recovery / S.C. Cramer // *Stroke*. – 2004. – Vol. 35. – P. 2695/
10. Ward N. S. Mechanisms underlying recovery of motor function after stroke / N. S. Ward, L. G. Cohen // *Archives of Neurology*. – 2004. – Vol. 61. – P. 1844.
11. Кондур А. А. Эффективность использования нейроинтерфейса в восстановлении двигательной функции руки после инсульта: дис. на соискание ученой степени канд.мед. наук: спец. 14.01.11 «Нервные болезни». / Кондур А. А. – Москва, 2017. – 185 с.
12. Ang K. K. Clinical study of neurorehabilitation in stroken using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback / K. K. Ang, C. Guan, K. S. Chua, [et al.] // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. – 2010. – P. 49–52.
13. Daly J. J. Feasibility of a new application of noninvasive brain computer interface (BCI): a case study of training for recovery of volitional motor control after stroke / J. J. Day, R. Cheng, J. Rogers, K. Litinas, K. Hrovat, M. Dohring // *Journal of Neurologic Physical Therapy*. – 2014. – Vol. 33. – P. 203–211.
14. Frolov A. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor- Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial / A. Frolov, O. Mokienko, R. Lukmanov, E. Biruykova, S. Kotov, L. Turbina, G. Nadareshvilyy, Y. Bushkova // *Frontiers in neuroscience*. – 2017. – Vol.11., No 400. – P. 1–11.
15. Shindo K. Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain-computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke: a preliminary case series study / K. Shindo, K. Kawashima, J. Ushiba, N. Oto, M. Ito, T. Oto, A. Kimura, M. Liu // *Journal of Rehabilitation Medicine*. – 2011. – Vol. 43, No10. – P. 951–957.
16. Prasad G. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study / G. Prasad, P. Herman [et al.] // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2010. – Vol. 7, No 1. – P. 60–68.
17. Buch E. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke / E. Buch, C. Weber, L.G. Cohen, C. Braun, M.A. Dimyan, T. Ard, J. Mellinger, A. Caria, S.R. Soekadar, A. Fourkas, N. Birbaumer // *Stroke*. – 2008. – Vol. 39. – P. 910–917.
18. Frolov A. Sources of EEG activity Stroke the most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery / A. Frolov, D. Husek, P. Bobrov [et. al.] // *Neural Network World*. – 2012. – Vol. 22, No 1. – P. 21.
19. Resquín F. Adaptive hybrid robotic system for rehabilitation of reaching movement after a brain injury: a usability study / F. Resquín, J. Gonzalez-Vargas, J. Ibáñez, F. Brunetti, I. Dimbwadyo, L. Carrasco, S. Alves, C. Gonzalez-Altred, A. Gomez-Blanco, J. L. Pons // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2017. – Vol.14, No 1. – P. 104. doi: 10.1186/s12984-017-0312-4.
20. Planelles D. Evaluating classifiers to detect arm movement intention from EEG signals / D. Planelles, E. Hortal, A. Costa, A. Ubeda, E. Iáez, J. M. Azorín // *Sensors (Basel)*. – 2014. – Vol.14., No 10. – P. 18172. doi: 10.3390/s141018172

21. Paek A. Y. Reconstructing surface EMG from scalp EEG during myoelectric control of a closed looped prosthetic device / A. Y. Paek, J. D. Brown, R. B. Gillespie, M. K. O'Malley, P. A. Shewokis, J. L. Contreras-Vidal // Conference proceedings - IEEE engineering in medicine and biology society. – 2013. doi: 10.1109/EMBC.2013.6610820.
22. Yue Z. Hand Rehabilitation Robotics on Poststroke Motor Recovery / Z. Yue, X. Zhang, J. Wang // Behavioural Neurology. – 2017. doi: 10.1155/2017/3908135.
23. Reinkensmeyer D. J. Understanding and treating arm movement impairment after chronic brain injury: progress with the ARM guide / D. J. Reinkensmeyer, L. E. Kahn, M. Averbuch [et al.] // The Journal of Rehabilitation Research and Development. – 2000. – Vol. 37, No 6. – P. 653.
24. Lum P. S. Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper limb motor function after stroke / P. S. Lum, C. G. Burgar, P. C. Shor [et al.] // Archives of physical medicine and rehabilitation. – 2002. – Vol. 83, No 7. – P. 952.
25. Hingtgen B. An upper extremity kinematic model for evaluation of hemiparetic stroke / B. Hingtgen, J. R. McGuire, M. Wang, G. F. Harris // Journal of Biomechanics. – 2006. – Vol. 39, No4. – P. 681.
26. Masiero S. Robotic-assisted rehabilitation of the upper limb after acute stroke / S. Masiero, A. Celia, G. Rosati, M. Armani // Archives of physical medicine and rehabilitation. – 2007. – Vol. 88, No 2. – P. 142.
27. Amirabdollahian F. Multivariate analysis of the Fugl\_Meyer outcome measures assessing the effectiveness of the GENTLE/S robot-mediated stroke therapy / F. Amirabdollahian, R. Loureiro, E. Gradwell [et al.] // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2007. – Vol. 4. – P. 4. doi:10.1186/1743-0003-4-4.
28. Iwamuro B. T. Effect of agravity-compensating orthosis on reaching after stroke: evaluation of the therapy assistant WREX / B. T. Iwamuro, E. G. Cruz, L. L. Connelly [et al.] // Archives of physical medicine and rehabilitation. – 2008. – Vol. 89. – P. 2121.
29. Динамика восстановления у пациентов с постинсультными двигательными нарушениями при повторных курсах нейрореабилитации с экзоскелетом кисти, управляемого интерфейсом «мозг–компьютер» / С. В. Котов, Е. В. Бирюкова, Л. Г. Турбина, А. А. Кондур, Е. В. Зайцева // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2017. – Т. 67 (4). – С. 445–52.
30. Burssens A. Influence of wrist position on maximum grip force in a post-operative orthosis / A. Burssens, N. Schelpe, J. Vanhaecke, M. Dezillie, F. Stockmans // Prosthet Orthot. – 2017. – Vol. 41, No 1. – P.78–84. doi: 10.1177/0309364615605395. Epub 2016 Jul 10.
31. Wang Z. R. Motion-based virtual reality training for improving motor functional recovery of upper limbs and neural reorganization in subacute stroke patients / Z. R. Wang, P. Wang, L. Xing, L. P. Mei, J. Zhao, T. Zhang // Neural Regeneration Research. – 2017. – Vol. 12, No 11. – P. 1823–1831. doi: 10.4103/1673-5374.219043.
32. Sadarangani P. G. Force Myography for Monitoring Grasping in Individuals with Stroke with Mild to Moderate Upper-Extremity Impairments: A Preliminary Investigation in a Controlled Environment / P. G. Sadarangani, X. Jiang, L. A. Simpson, J. J. Eng, C. Menon // Frontiers in bioengineering and biotechnology. – 2017. – No 5. – P. 42. – Published online, 2017, Jul 27. doi: 10.3389/fbioe.2017.00042.
33. Jack D. Virtual reality enhanced stroke rehabilitation / D. Jack, R. Boian, A. S Merians [et al.] // IEEE Transactions of Neural Systems Rehabilitation Engineering. – 2001. – Vol. 9. – P. 308.
34. Holden M. K. Virtual environment based telerehabilitation in patients with stroke / M. K. Holden, T. A. Dyar, L. Schwamm, E. Bizzi // Presence: Teleoperations and Virtual Environments. – 2005. – Vol. 14. – P. 214.
35. Takahashi C. D. Robot-based hand motor therapy after stroke / C. D. Takahashi, L. Der-Yeghianian, V. Le [et al.] // Brain. – 2008. – Vol. 131. – P. 425–437.
36. Volpe B. T. Robotic devices as therapeutic and diagnostic tools for stroke recovery / B. T. Volpe, P. T. Huerta, J. L. Zipse [et al.] // A. M. A. archives of neurology. – 2009. – Vol. 66. – P. 1086.
37. Decety J. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? / J. Decety, M. Jeannerod // Behavioural Brain Research. – 1995. – Vol. 72. – P. 127
38. Berthoz A. The role of inhibition in the hierarchical gating of executed and imagined movements / A. Berthoz // Cognitive Brain Research. – 1996. – Vol. 3. – P. 101
39. Lotze M. Motor imagery / M. Lotze, U. Halsband // The Journal of Physiology. – 2006. – Vol. 99. – P. 386

40. Пирадов М. А. Пластичность мозга и современные технологии нейрореабилитации / М. А. Пирадов, Л. А. Черникова, Н. А. Супонева // Вестник Российской Академии Наук. – 2018. – Т. 88, №4. – С. 299–312.
41. Johnson R. E. EMG versus torque control of human-machine systems: equalizing control signal variability does not equalize error or uncertainty / R. E. Johnson, K. P. Kording, L. J. Hargrove, J. W. Sensinger // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering. – 2017. – Vol. 25, No 6. – P. 660–667. doi: 10.1109/TNSRE.2016.2598095. Epub 2016 Aug 25.
42. Xiao Z. G. Towards the development of a wearable feedback system for monitoring the activities of the upper-extremities / Z. G Xiao, C. Menon // Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation. – 2014. – Vol. 11, No 2. – P. 654.
43. Sadarangani G. P. Force Myography for Monitoring Grasping in Individuals with Stroke with Mild to Moderate Upper-Extremity Impairments: A Preliminary Investigation in a Controlled Environment / G. P. Sadarangani, X. Jiang, L. A. Simpson, J. J. Eng, C. Menon // Frontiers in bioengineering and biotechnology. – 2017. – Vol. 5. – No 42. – Published online, 2017 Jul 27. doi: 10.3389/fbioe.2017.00042.
44. Информационная система биологической обратной связи по электромиографическому каналу с использованием очков дополненной реальности / Я. А. Туровский, Я. В. Арефьев, А. В. Алексеев, Ю. А. Ипполитов // Journal of new medical technologies. – 2017. – V. 24, № 2. – P. 147–151. doi: 10.12737/article\_5947d3f44242c4.01994237
45. Tactile feedback is an effective instrument for the training of grasping with a prosthesis at low- and medium-force levels / A. M. De Nunzio, S. Dosen, S. Lemling, M. Markovic, M. A. Schweisfurth, N. Ge, B. Graimann, D. Falla, D. Farina // Exp Brain Res. 2017 Aug; 235(8):2547-2559. doi: 10.1007/s00221-017-4991-7. Epub 2017 May 26.
46. Lüdemann-Podubecká J. Repetitive transcranial magnetic stimulation for motor recovery of the upper limb after stroke. Neural correlates of motor recovery after stroke / Lüdemann-Podubecká J., Bösl K., Nowak D. A. // Prog. Brain Res. – 2015. – № 218. – P. 281–311.
47. On the relations between the direction of two-dimensional (2D) arm movements and cell discharge in primate motor cortex / A. P. Georgopoulos, J. F. Kalaska, M. D. Crutcher [et al.] // J. Neurosci. – 1982. – V. 2. – P. 1527.
48. Lebedev M. A. Brain-machine interfaces: past, present and future / M. A. Lebedev, M. A. L. Nicolelis // Trends in Neurosciences. – 2006. – V. 29, № 9. – P. 536.
49. Sutton S. Evoked correlates of stimulus uncertainty / S. Sutton, M. Braren, J. Zubin, E.R. John // Science. – 1965. – V. 150. – P. 1187.
50. Donchin E. The contingent negative variation and the late positive wave of the average evoked potential / E. Donchin, D.B. Smith // EEG and Clin. Neurophysiol. – 1970. – V. 29. – P. 201.
51. Adaptive brain interfaces for physically disabled people / J. del R. Millan, J. Mourino, M.G. Marciani [et al.] // 2nd Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Science. Hong Kong. – 1998. – P. 2008.
52. Котов С.В. Реабилитационный потенциал постинсультных больных, обучающихся кинестетическому воображению движения – двигательный и когнитивный аспекты / Котов С.В., Турбина Л.Г., Бирюкова Е.В., Фролов А.А., Кондур А.А., Зайцева Е.В., Бобров П.Д. // Физиология человека – 2017. – Т.43 – С. 52–62.
53. Pfurtscheller G. Patterns of cortical activation during planning of voluntary movement / G. Pfurtscheller, A. Berghold // EEG and Clin. Neurophysiol. – 1989. – V. 72. – P. 250.
54. Pfurtscheller G. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles / G. Pfurtscheller, F. H. Lopes da Silva // Clin. Neurophysiol. – 1999. – V. 110. – P. 1842–57.
55. Jeannerod M. Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition / Jeannerod M. // Neuroimage. – 2001. – V. 14. – P. 103.
56. Иваницкий Г.А. Распознавание типа решаемой в уме задачи по нескольким секундам ЭЭГ с помощью обучаемого классификатора / Иваницкий Г. А. // Журн. высш. нерв. деятельности. – 1997. – Т. 47. – С. 743.
57. Николаев А. Р. Воспроизводящиеся паттерны альфа-ритма ЭЭГ при решении психологических задач / А. Р. Николаев, Г. А. Иваницкий, А. М. Иваницкий // Физиология человека. – 1998. – Т. 24, № 3. – С. 5.

58. Применение методов пневмографии и стабилотрии в диагностике и коррекции функционального состояния спортсмена в стрелковом спорте / Р. Н. Салихова, М. Б. Коликов, Д. А. Напалков, П. О. Ратманова, В. В. Шиян // Теория и практика прикладных и экстремальных видов спорта. – 2012. – № 2. – С. 37–40.
59. Сафронова Н.С. Эффективность тренинга с биоуправлением в совершенствовании координационных способностей студенток занимающихся бадминтоном / Н.С. Сафронова, Е.И. Нагаева, П.С. Сафронова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия Биология. Химия. – 2018. – Т. 4(70), № 3. – С. 163–173.
60. Гроховский С. С. К вопросу о "дозе" двигательной реабилитации после инсульта: обзор / С. С. Гроховский, О. В. Кубряк // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 66–71.
61. Peters D.M. Counting repetitions: an observational study of video game play in people with chronic poststroke hemiparesis. / Peters D.M., McPherson A.K., Fletcher B., McClenaghan B.A., Fritz S.L. // J. Neurol. Phys. Ther. – 2013. – 37(3). – P. 105–111.
62. Фещенко В.С. Постуральные нарушения у спортсменов высокой квалификации. Принципы диагностики и коррекции : автореф. дис. ... канд. мед. наук : 14.03.11 / Фещенко В.С. – М., 2013. –27 с.
63. Шишкина Е.С. Динамика устойчивости у больных в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта в процессе тренировки на стабилотрической платформе : автореф. дис.... канд. мед. наук : 14.01.11 / Шишкина Е.С. – Пермь, 2014. –22 с.
64. Муравьева Н.В. Диагностика и коррекция постуральных нарушений у пациентов с гемипарезом : автореф. дис. ... канд. мед. наук : 14.03.11. / Муравьева Н.В. –М., 2015. –24 с.
65. Lloréns R. Effectiveness, usability, and cost-benefit of a virtual reality-based telerehabilitation program for balance recovery after stroke: a randomized controlled trial. / Lloréns R., Noé E., Colomer C., Alcañiz M. // Arch. Phys. Med. Rehabil. – 2015. – 96(3). – P. 418–25.
66. Peters D.M. Counting repetitions: an observational study of video game play in people with chronic poststroke hemiparesis. / Peters D.M., McPherson A.K., Fletcher B., McClenaghan B.A., Fritz S.L. // J. Neurol. Phys. Ther. – 2013. – 37(3). – P. 105–111.
67. Lang C.E. Dose and timing in neurorehabilitation: prescribing motor therapy after stroke. / Lang C.E., Lohse K.R., Birkenmeier R.L. // Curr. Opin. Neurol. – 2015. – 28(6). – P. 549–55.

## **UPPER LIMBS DISORDERS PATIENTS MOTOR REHABILITATION: OF THE MODERN STUDIES ANALYSIS (REVIEW)**

***Chuyan E. N.<sup>1</sup>, Birukova E. A.<sup>1</sup>, Babanov N. D.<sup>2</sup>***

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia  
Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia  
E-mail: biotema@mail.ru*

The article was devoted analysis of the current state of motor research rehabilitation of patients with impaired motility of the upper limbs.

The large number of modern publications dedicated to the restoration of motor functions by stimulating natural mechanisms of brain plasticity indicative of advanced character research data aimed at development New technologies and methods of medical rehabilitation patients with neurological disorders including motility disorders of the upper limbs It should also be noted that most of the works on this issue has a pronounced applied character descriptions of patient rehabilitation activities with movement disorders and basic research is dedicated to identifying system mechanisms biocontrol movement in biofeedback mode not enough yet. Consequently, we are faced with a typical scientific

situation when the practical application of new ideas is ahead of the understanding of the mechanisms actions of new methods and technologies underlying them. At the same time in the scientific literature note two main aspects: the positive effect use of robotic systems with PE in practice post-stroke rehabilitation and the second one, which is that progress in developing more advanced systems and technologies for their application rests on lack of understanding of the principles of motion control by the CNS what may sometimes raise doubts about the effectiveness of these technologies. There is not enough clarity on the question of what particular neural mechanisms and under what conditions (including under what mode the inclusion of limbs) better achieved the goal of motor rehabilitation. Research effort requires and justification of the motor mode ways to control procedures, refine and select reliable markers of patient conditions. The urgent task is to establish the optimal modes motor learning, taking into account the relationship of performance and performance motor tasks in the mode of Biofeedback mode-control of the upper limb with the total volume and mode of the motor load.

Obviously, to solve these and other problems it is necessary, on the one hand, to significantly expand the number of parametres characterizing the functional state subjects or patients in the process of performing a motor task in biofeedback mode, and, on the other hand, to develop methodological techniques allowing to judge the impact.

**Keywords:** movement biocontrol, biofeedback, motor load, stabilometry, motor learning, functional state, neurocomputer interface, neurorehabilitation, robotics.

*Supported by Grant of the State Council of the Republic of Crimea for young scientists for 2019. Head Birukova E.A.*

#### References

1. Daly J. J., Ruff R. L. Construction of efficacious gait and upper limb functional interventions based on brain plasticity evidence and model-based measures for stroke patients, *Scientific World Journal*, **7**, 2031 (2007).
2. Chernikova L. A. Brain plasticity and modern rehabilitation technologies, *Annals of Clinical and Experimental Neurology*, **1**, **2**, 40 (2007).
3. Bach Y., Rita P. Theoretical and practical considerations in the restoration of function after stroke, *Top Stroke Rehabilitation*, **8**, **3**, 1 (2001).
4. Korolev A. A., Suslova G. A. Neurorehabilitation: modern technologies of restorative treatment of post-stroke spasticity, *Fundamental'nyye issledovaniya*, **7**, **2**, 344 (2012).
5. Frolov A. A., Mokienko O., Lyukmanov R., Biryukova E., Kotov S., Turbina L., Nadareyshvily G., Bushkova Y. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial, *Frontiers in Neuroscience*, **11**, **400**. (2017) – Published online.2017 Jul 20. doi: 10.3389/fnins.2017.00400
6. Frolov A. A. Biryukova E. V., Bobrov P. D., Mokienko O. A., Platonov A. K., Pryanichnikov V.E., Chernikova L. A. Principles of neurorehabilitation based on the use of the brain-computer interface and biologically adequate control of exoskeleton, *Human Physiology*, **39**, **2**, 99 (2013).
7. Netz J., Lammers T., Homberg V. Reorganization of motor output in the non affected hemisphere after stroke, *Brain*, **120**, 1579 (1997).
8. Platz T., Kim I.H., Pintschovius H. [et al.] Multimodal EEG analysis in man suggests impairment specific changes in movement related electric brain activity after stroke, *Brain*, **123**, 2475 (2002).
9. Cramer S.C. Functional imaging in stroke recovery, *Stroke*, **35**, 2695 (2004).
10. Ward N. S., Cohen L. G. Mechanisms underlying recovery of motor function after stroke, *Archives of Neurology*, **61**, 1844 (2004).

11. Kondur A. A. *Efficiency of using neurointerface in restoring the motor function of a hand after a stroke: dis. for the degree of Cand.med. Sciences: spec. 01.11 "Nervous diseases"*, 185 p. (Moscow, 2017).
12. Ang K. K., Guan C., Chua K. S., [et al.] Clinical study of neurorehabilitation in stroken using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 49 (2010).
13. Daly J. J., Cheng R., Rogers J., Litinas K., Hrovat K., Dohring M. Feasibility of a new application of noninvasive brain computer interface (BCI): a case study of training for recovery of volitional motor control after stroke, *Journal of Neurologic Physical Therapy*, **33**, 203 (2014).
14. Frolov A., Mokienko O., Lukmanov R., Biruykova E., Kotov S., Turbina L., Nadareshviyly G., Bushkova Y. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor- Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial, *Frontiers in neuroscience*, **11**, **400**, 1 (2017).
15. Shindo K., Kawashima K., Ushiba J., Oto N., Ito M., Oto T., Kimura A., Liu M. Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain-computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke: a preliminary case series study, *Journal of Rehabilitation Medicine*, **43**, **10**, 951 (2011).
16. Prasad G., Herman P. [et al.] Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **7**, **1**, 60 (2010).
17. Buch E., Weber C., Cohen L.G., Braun C., Dimyan M.A., Ard T., Mellinger J., Caria A., Soekadar S.R., Fourkas A., Birbaumer N. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke, *Stroke*, **39**, 910 (2008).
18. Frolov A., Husek D., Bobrov P. [et. al.] Sources of EEG activity Stroke the most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery, *Neural Network World*, **22**, **1**, 21 (2012).
19. Resquín F., Gonzalez-Vargas J., Ibáñez J., Brunetti F., Dimbwadyo L., Carrasco L., Alves S., Gonzalez-Altred C., Gomez-Blanco A., Pons J.L. Adaptive hybrid robotic system for rehabilitation of reaching movement after a brain injury: a usability study, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **14**, **1**, 104 (2017). doi: 10.1186/s12984-017-0312-4.
20. Planelles D., Hortal E., Costa A., Ubeda A., Iáez E., Azorín J. M. Evaluating classifiers to detect arm movement intention from EEG signals, *Sensors (Basel)*, **14**, **10**, 18172 (2014). doi: 10.3390/s141018172
21. Paek A. Y., Brown J. D., Gillespie R. B., O'Malley M. K., Shewokis P. A., Contreras-Vidal J. L. Reconstructing surface EMG from scalp EEG during myoelectric control of a closed looped prosthetic device, *Conference proceedings – IEEE engineering in medicine and biology society*, (2013). doi: 10.1109/EMBC.2013.6610820.
22. Yue Z., Zhang X., Wang J. Hand Rehabilitation Robotics on Poststroke Motor Recovery, *Behavioural Neurology*, (2017). doi: 10.1155/2017/3908135.
23. Reinkensmeyer D. J., Kahn L. E., Averbuch M. [et al.] Understanding and treating arm movement impairment after chronic brain injury: progress with the ARM guide, *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, **37**, **6**, 653 (2000).
24. Lum P. S., Burgar C. G., Shor P. C. [et al.] Robot assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper limb motor function after stroke, *Archives of physical medicine and rehabilitation*, **83**, **7**, 952 (2002).
25. Hingtgen B., McGuire J. R., Wang M., Harris G. F. An upper extremity kinematic model for evaluation of hemiparetic stroke, *Journal of Biomechanics*, **39**, **4**, 681 (2006).
26. Masiero S., Celia A., Rosati G., Armani M. Robotic assisted rehabilitation of the upper limb after acute stroke, *Archives of physical medicine and rehabilitation*, **88**, **2**, 142 (2007).
27. Amirabdollahian F., Loureiro R., Gradwell E. [et al.] Multivariate analysis of the Fugl Meyer outcome measures assessing the effectiveness of the GENTLE/S robotmediated stroke therapy, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **4**, **4**. (2007). doi:10.1186/1743 0003
28. Iwamuro B., T. Cruz E. G., Connelly L. L. [et al.] Effect of agravity compensating orthosis on reaching after stroke: evaluation of the therapy assistant WREX, *Archives of physical medicine and rehabilitation*, **89**, 2121 (2008).
29. Kotov S. V., Biryukova E. V., Turbina L. G., Kondur A. A., Zaitseva E. V. Dynamics of recovery in patients with post-stroke motor disorders during repeated courses of neurorehabilitation with a brush

- exoskeleton controlled by a brain-computer interface, *I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*, **67** (4), 445 (2017).
30. Burssens A. Schelpe N., Vanhaecke J., Dezillie M., Stockmans F., Influence of wrist position on maximum grip force in a post-operative orthosis, *Prosthet Orthot.*, **41**, **1**, 78. doi: 10.1177/0309364615605395. Epub 2016 Jul 10 (2017).
  31. Wang Z. R., Wang P., Xing L., Mei L. P., Zhao J., Zhang T. Motion-based virtual reality training for improving motor functional recovery of upper limbs and neural reorganization in subacute stroke patients, *Neural Regeneration Research.*, **12**, **11**, 1823, doi: 10.4103/1673-5374.219043. (2017).
  32. Sadarangani P., Jiang G. X., Simpson L. A., Eng J. J., Menon C. Force Myography for Monitoring Grasping in Individuals with Stroke with Mild to Moderate Upper-Extremity Impairments: A Preliminary Investigation in a Controlled Environment, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, **5**, 42. – Published online, 2017, Jul 27. (2017). doi: 10.3389/fbioe.2017.00042.
  33. Jack D., Boian R., Merians A. S [et al.] Virtual reality enhanced stroke rehabilitation, *IEEE Transactions of Neural Systems Rehabilitation Engineering*, **9**, 308 (2001).
  34. Holden M. K., Dyar T. A., Schwamm L., Bizzi E. Virtual environment based telerehabilitation in patients with stroke, *Presence: Teleoperations and Virtual Environments*, **14**, 214 (2005).
  35. Takahashi C. D. Der-Yeghianian L., Le V. [et al.] Robotbased hand motor therapy after stroke, *Brain*, **131**, 435 (2008).
  36. Volpe B. T., Huerta P. T., Zipse J. L. [et al.] Robotic devices as therapeutic and diagnostic tools for stroke recovery, *A. M. A. archives of neurology*, **66**, 1086 (2009).
  37. Decety J., Jeannerod M. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? *Behavioural Brain Research*, **72**, 127 (1995).
  38. Berthoz A. The role of inhibition in the hierarchical gating of executed and imagined movements, *Cognitive Brain Research.*, **3**, 101 (1996).
  39. Lotze M., Halsband U. Motor imagery, *The Journal of Physiology*, **99**, 386 (2006)
  40. Piradov M. A., Chernikova L. A., Suponeva N. A Brain plasticity and modern technologies of neurorehabilitation, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, **88**, **4**, 299 (2018).
  41. Johnson R. E., Kording K. P., Hargrove L. J., Sensinger J. W. EMG versus torque control of human-machine systems: equalizing control signal variability does not equalize error or uncertainty, *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, **25**, **6**, 660 (2017). doi: 10.1109/TNSRE.2016.2598095. Epub 2016 Aug 25.
  42. Xiao Z. G., Menon C. Towards the development of a wearable feedback system for monitoring the activities of the upper-extremities, *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, **11**, **2**, 654 (2014).
  43. Sadarangani G. P., Jiang X., Simpson L. A., Eng J. J., Menon C. Force Myography for Monitoring Grasping in Individuals with Stroke with Mild to Moderate Upper-Extremity Impairments: A Preliminary Investigation in a Controlled Environment, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, **5**, **42**. (2017). Published online, 2017 Jul 27. doi: 10.3389/fbioe.2017.00042.
  44. Turovsky Ya. A., Arefyev Ya. V., Alekseev A. V., Ippolitov Yu. A. Biological feedback information system for the electromyographic channel using augmented reality glasses, *Journal of new medical technologies*, **24**, **2**, 147 (2017). doi: 12737artide\_5947d3f44242c4.01994237
  45. De Nunzio A. M., Dosen S., Lemling S., Markovic M., Schweisfurth M. A., Ge N., Graimann B., Falla D., Farina D., Tactile feedback is an effective instrument for the training of grasping with a prosthesis at low- and medium-force levels, *Exp Brain Res.*, **235**(8), 2547 (2017). doi: 10.1007/s00221-017-4991-7. Epub 2017 May 26.
  46. Lüdemann-Podubecká J., Bösl K., Nowak D. A. Repetitive transcranial magnetic stimulation for motor recovery of the upper limb after stroke. Neural correlates of motor recovery after stroke, *Prog. Brain Res.*, **218**, 281 (2015).
  47. Georgopoulos A. P., Kalaska J. F., Crutcher M. D. [et al.] On the relations between the direction of two dimensional (2D) arm movements and cell discharge in primate motor cortex, *J. Neurosci.*, **2**, 1527 (1982).
  48. Lebedev M. A., Nicolelis M. A. L. Brain machine interfaces: past, present and future, *Trends in Neurosciences*, **29**, **9**, 536 (2006).
  49. Sutton S., Braren M., Zubin J., John E.R. Evoked correlates of stimulus uncertainty, *Science*, **150**, 1187 (1965).

50. Donchin E., Smith D.B., The contingent negative variation and the late positive wave of the average evoked potential, *EEG and Clin. Neurophysiol.*, **29**, 201 (1970).
51. Millan J.del R., Mourino J., Marciani M.G. [et al.] Adaptive brain interfaces for physically disabled people, *2nd Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Science. Hong Kong*, 2008 (1998).
52. Kotov S.V., Turbina L.G., Biryukova E.V., Frolov A.A., Kondur A.A., Zaytseva E.V., Bobrov P.D. The rehabilitation potential of post-stroke patients studying the kinesthetic movement imagination – motor and cognitive aspects, *Human Physiology*, **43**, 52 (2017).
53. Pfurtscheller G., Berghold A. Patterns of cortical activation during planning of voluntary movement, *EEG and Clin. Neurophysiol.*, **72**, 250 (1989).
54. Pfurtscheller G., Lopes da Silva F. H. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles, *Clin. Neurophysiol.*, **110**, 1842 (1999).
55. Jeannerod M. Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition, *Neuroimage*, **14**, 103 (2001).
56. Ivanitsky G.A. Recognition of the type of a problem to be solved in the mind for several seconds of an EEG using a trained classifier, *Neuroscience and Behavioral Physiology*, **47**, 743 (1997).
57. Nikolaev A. R., Ivanitsky G. A., Ivanitsky A. M. Recognition of the type of a problem to be solved in the mind for several seconds of an EEG using a trained classifier, *Human Physiology*, **24**, 3, 5 (1998).
58. Salikhova R. N., Kolikov M. B., Napalkov D. A., Ratmanova P. O., Shiyan V. V., The use of methods of pneumography and stabilometry in the diagnosis and correction of the functional state of an athlete in shooting sports, *Theory and practice of applied and extreme kinds of sport*, **2**, 37 (2012).
59. Safronova N.S., Nagaeva E.I., Safronova P.S. The effectiveness of training with biocontrol in improving the coordination abilities of female students involved in badminton, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **4(70)**, **3**, 163 (2018).
60. Grokhovsky S.S., Kubryak O.V. To the question of the “dose” of motor rehabilitation after a stroke: a review, *Russian Journal of the Physial Therapy, Balneotherapy and Rehabilitation*, **17**, **2**, 66 (2018).
61. Peters D.M., McPherson A.K., Fletcher B., McClenaghan B.A., Fritz S.L. Counting repetitions: an observational study of video game play in people with chronic poststroke hemiparesis. *J. Neurol. Phys. Ther.*, **37(3)**, 105 (2013).
62. Feschenko V.S. Postural'nyye narusheniya u sportsmenov vysokoy kvalifikatsii. Printsipy diagnostiki i korrektsii : avtoref. dis. kand. med. Nauk [Postural disorders in athletes of high qualification. Principles of diagnosis and correction. Dissertation of the candidate of medical sciences]: 14.03.11. – 27 p. (M., 2013).
63. Shishkina E.S. Dinamika ustoychivosti u bol'nykh v rannem vosstanovitel'nom periode ishemicheskogo insulta v protsesse trenirovki na stabilometricheskoy platforme [Dynamics of resistance in patients in the early recovery period of ischemic stroke in the process of training on a stabilometric platform. Dissertation of the candidate of medical sciences ] 14.01.11 – 22 p. (Perm, 2014).
64. Muravyova N.V. Diagnostika i korrektsiya postural'nykh narusheniy u patsiyentov s gemigipoplaziyey [Diagnosis and correction of postural disorders in patients with hemihypoplasia. Dissertation of the candidate of medical sciences ] : 14.03.11. – 24 p. (M., 2015).
65. Lloréns R., Noé E., Colomer C., Alcañiz M. Effectiveness, usability, and cost-benefit of a virtual reality-based telerehabilitation program for balance recovery after stroke: a randomized controlled trial. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **96(3)**, 418 (2015).
66. Peters D.M., McPherson A.K., Fletcher B., McClenaghan B.A., Fritz S.L. Counting repetitions: an observational study of video game play in people with chronic poststroke hemiparesis. *J. Neurol. Phys. Ther.*, **37(3)**, 105 (2013).
67. Lang C.E., Lohse K.R., Birkenmeier R.L. Dose and timing in neurorehabilitation: prescribing motor therapy after stroke. *Curr. Opin. Neurol.*, **28(6)**, 549 (2015).