

DOI: 10.36425/2658-6843-2019-3-63-72

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЭКСОСКЕЛЕТА КИСТИ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР И РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ ПРИ ПОСТИНСУЛЬТНОМ ПАРЕЗЕ РУКИ

УДК 616.8

Люкманов Р.Х.^{1,2}, Мокиенко О.А.¹, Азиатская Г.А.¹, Супонева Н.А.¹, Пирадов М.А.¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научный Центр Неврологии»

²Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова

POST STROKE REHABILITATION: CLINICAL EFFICACY OF BCI-DRIVEN HAND EXOSKELETON IN COMPARISON WITH "AMADEO" ROBOTIC MECHANOTHERAPY

Lyukmanov R.Kh.^{1,2}, Mokienko O.A.¹, Aziatskaya G.A.¹, Suponeva N.A.¹, Piradov M.A.¹

¹Research Center of Neurology, Moscow, Russia

²Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Введение

Известно, что наиболее частым последствием инсульта (ОНМК) остаются двигательные нарушения различной степени выраженности, являющиеся одной из главных причин инвалидности у лиц трудоспособного возраста. По оценке некоторых авторов, ведущей причиной потери профессиональных навыков у 80% таких пациентов является моторная дисфункция руки (особенно кисти), при этом полное восстановление функции через 6 месяцев после развития заболевания наблюдается только в 11,6% случаев [10-12]. В Российской Федерации за 2017 год зарегистрировано 411535 случаев ОНМК, что обуславливает высокую актуальность и социально-экономическую значимость поиска наиболее эффективных и рациональных стратегий в постинсультной нейрореабилитации [1].

В многочисленных работах показано, что обучение движению в отличие от пассивного многократного повторения такого движения потенцирует более устойчивые нейрофизиологические явления в области первичной моторной коры, соответствующие нейропластическим процессам и приводит к более значительному восстановлению двигательных функций [13-20]. Ключевым элементом считают направленность упражнений на достижение заранее определённой цели, а также функциональную значимость упражнений для пациента (с учётом трудового и бытового преморбидного статуса). По данным систематических обзоров и мета-анализов, одной из наиболее эффективных методик в нейрореабилитации является терапия ограничением движения (constraint-induced movement therapy, CIMT), которая включена в национальные руководства по ведению постинсультных пациентов таких стран, как США, Бельгия, Англия [3, 21, 22]. По сути это один из вариантов лечебной гимнастики, который,

кроме тренировки целенаправленных движений, предусматривает одновременную фиксацию здоровой руки до 90% времени бодрствования в дни тренировок [23-24]. Все прочие методы двигательной реабилитации условно распределяются по степени своей эффективности между пассивными тренировками (минимальная эффективность) и CIMT (максимальная эффективность).

Следует отметить, что методы с активными двигательными парадигмами (т.е. терапия, основанная на ограничении, эрготерапия, силовые тренировки и т.д.) могут быть применимы для обучения движению при парезе в руке лишь легкой или умеренной тяжести, т.е. в тех случаях, когда собственные движения пациента сохранены на 75-50% от нормального и речь идёт о стремлении увеличить силу, улучшить ловкость, мелкую моторику. В случае выраженного и грубого пареза (резкое ограничение произвольных движений – 25-10% от нормального объёма движения) спектр применяемых методик с доказанной эффективностью существенно сужается, снижаются их возможности в части репертуара тренируемых движений, интенсивности. Плегия (0% объёма произвольного движения) практически исключает обучение движению, пациенту в этом случае остаются доступными пассивные подходы, РТ в ассистивных режимах, зеркальная терапия и мысленные тренировки.

В настоящее время наблюдается активное внедрение разнообразных роботизированных технологий в нейрореабилитацию. Основные преимущества РТ перед классической ЛФК с целенаправленными упражнениями заключаются в обеспечении высокой интенсивности тренировок, точной повторяемости движения и более широким спектром возможностей предъявления обратной связи [25]. Однако при возможности обеспечения сопоставимой интенсивности тренировок, традицион-

Таблица 1. Данные доказательности по РТ в двигательной реабилитации

| Источник | Уровень доказательности метода | Комментарии |
|------------------------------------|--------------------------------|--|
| Рекомендации ASA/ANA (США) | IIa, A | РТ целесообразно назначать пациентам с умеренным или выраженным парезом для обеспечения высокой интенсивности тренировок. |
| Рекомендации RCP (Великобритания) | Средний/низкий | Постинсультным пациентам с сохранными движениями или потенциалом их восстановления необходимы тренировки высокой интенсивности с движениями, имитирующими конкретную задачу. |
| Систематический обзор Hatem et al. | Средний | Эффективность РТ не превышает эффективность кинезиотерапии при сопоставимой интенсивности. Основное преимущество РТ – обеспечение высокой интенсивности тренировок. |

ные методы двигательной реабилитации не уступают по эффективности тренировкам с применением РТ [3, 21]. Место РТ в клинических рекомендациях представлено в Таблице 1.

В целом, роботизированные методики для проведения тренировок с паретичной рукой предполагают использование целенаправленных упражнений с различными вариантами ассистивной или резистивной модуляции их выполнения внешним устройством для проксимальных или дистальных отделов руки разной степени антропоморфности с синхронным предоставлением обратной связи.

Мысленная тренировка (идеаторная или идеомоторная тренировка в отечественной терминологии) является методикой с активным участием и применима у пациента, имеющего грубый парез или пlegию кисти. Метод мысленных тренировок основан на представлении определённого движения, его планировании. В многочисленных исследованиях показано, что ПД сопровождается повышением возбудимости моторной коры, кортикоспинального тракта и спинальных ансамблей мотонейронов, а также снижением активности корковых ГАМК-ергических вставочных нейронов: то есть процессами, регистрируемыми в норме на фоне произвольных движений [26-31]. На этом основании принято считать, что ПД стимулирует те же пластические процессы в «целевых» моторных зонах головного мозга, а также способно совершенствовать моторные двигательные акты, что и тренировки реальных движений [32, 33]. Описанные феномены использованы в качестве научного обоснования применения подхода в обучении двигательным навыкам как здоровых людей, спортсменов, так и в нейрореабилитации для восстановления двигательной функции руки после инсульта, в том числе – при грубом парезе и пlegии путём воздействия на процессы нейропластичности и модуляции активности кортикоспинального тракта [32, 33].

В систематическом обзоре по реабилитации пациентов с постинсультным парезом руки, включавшем данные 5 РКИ, 5 систематических обзоров и мета-анализов, методике мысленных тренировок с парадигмой ПД был присвоен уровень доказательности А при условии применения ее в качестве адьювантного метода к стандартной двигательной реабилитации (ЛФК, СИМТ и т.д.), начиная с раннего восстановительного периода при любой степени пареза [3, 21]. В качестве движения, представляемого во время тренировок, наиболее часто предлагается какое-либо функционально значимое для пациента – например, захват стакана с водой, использование столовых приборов, чистка зубов, при этом рекомендуемая интенсивность занятий составляет от 1 часа в неделю не менее

6 недель [34, 35].

Расширением возможностей метода ПД за счёт предъявления обратной связи стало применение технологии ИМК, основанной на распознавании сенсо-моторных ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [36-41]. С развитием ИМК стало возможным объективизировать процесс ПД в режиме «онлайн», что реализует предъявление обратной связи любых модальностей (в зависимости от подключаемого к ИМК устройства), позволяет контролировать интенсивность процедур, а главное – открывает серьёзные перспективы для пациентов с грубым парезом и пlegией, т.к. метод ПД основан на непосредственном активном обучении пациента. Такие ожидания учёных подтверждаются исследованиями последних лет [28, 42-46]. В большинстве работ, посвящённых технологии ИМК, используются устройства, реализованные на неинвазивной регистрации и распознавании реакции синхронизации/десинхронизации паттернов ЭЭГ, возникающей при мысленном движении, в качестве управляющего сигнала для устройства, подключаемого к компьютеру для предъявления обратной связи пациенту [47].

Развитием исследований в области оценки подходов к предъявлению обратной связи различных модальностей стала работа Оно Т. с коллегами, в которой было показано, что для предъявления обратной связи предпочтительным является использование экзоскелета кисти, обеспечивающего кинестетическую афферентацию, в отличие от одной визуальной обратной связи, предъявляемой с экрана компьютера [39]. Это подтвердило тезис о модуляции сенсомоторных таламокортикальных цепей с помощью афферентного воздействия от проприорецепторов конечностей [30]. Приведённые данные являются предпосылками для применения ИМК у пациентов с грубыми постинсультными парезами или пlegией, в том числе при обширном повреждении первичной моторной и соматосенсорной коры, а также служат обоснованием применения экзоскелета кисти в качестве метода предъявления кинестетической обратной связи.

Согласно проанализированным клиническим рекомендациям, технологии РТ и методы ПД (в том числе с применением ИМК), показали свою эффективность при условии использования в качестве расширения основного протокола реабилитации. Однако в настоящее время не установлено, может ли технология ИМК с экзоскелетом кисти быть использована вместо применяемых в практике роботизированных методов или же должна лишь дополнять их. Кроме того, не полностью описан профиль пациентов, для которых применение ИМК-экзоскелет может быть наиболее целесообразным. Авторы систематических обзоров, посвящённых изучению данных под-

ходов, подчёркивают важность накопления клинических данных и развития методик их использования.

Материалы и методы исследования

Работа проводилась в ФГБНУ «Научный центр неврологии» (Москва) с 2016 по 2018 гг. на базе отделения нейрореабилитации и физиотерапии, протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом ФГБНУ НЦН (заключение №8-6/16 от 14.09.16 г.). Все пациенты перед включением в исследование подписали информированное согласие.

Объектом проспективного открытого рандомизированного контролируемого исследования в параллельных группах являлись пациенты с последствиями единичного ОНМК с очагом супратенториальной локализации и парезом в руке, которым было проведено клиническое обследование с использованием неврологических шкал. В исследование были включены 55 пациентов, демографические и основные исходные данные пациентов обеих групп были статистически сопоставимы (представлены в Таблице 2).

Врач, производивший осмотр, не был осведомлён о результатах распределения пациента в ту или иную группу для устранения систематической ошибки при оценке клинических показателей. Методика клинического обследования заключалась в неврологическом осмотре пациента с оценкой объёма движений и силы в руке с помощью двигательных шкал Фугл-Мейера и ARAT (Action Research Arm Test) до начала и по окончании исследования [48-51]. Шкала Фугл-Мейера представляет собой набор тестовых движений для детальной оценки функции мышц верхней и нижней конечности, а также туловища. В данной работе были использованы данные, полученные из разделов шкалы для руки, включая произвольные движения проксимальных и дистальных отделов, объём пассивных движений, боль и чувствительность. Максимальное количество баллов по данной шкале составляет 126, что соответствует нормальной функции.

Для изучения функциональных возможностей паретичной руки пациента была использована шкала ARAT, представляющая собой набор предметов для оценки основных видов захвата кисти и нескольких движений в проксимальных отделах руки (Рисунок 1).

По инструкции специалиста пациент выполнял один из видов захвата с помощью предложенных предметов, каждое движение оценивалось по шкале от 0 до 3 баллов с максимальным общим количеством 57. Подразделы шкалы ARAT учитывают возможность реализации и оценки шаровидного, цилиндрического и щипкового захватов в ходе выполнения функционально значимых, целенаправленных движений.

Независимо от группы исследования, помимо медикаментозной терапии, назначавшейся лечащим врачом,

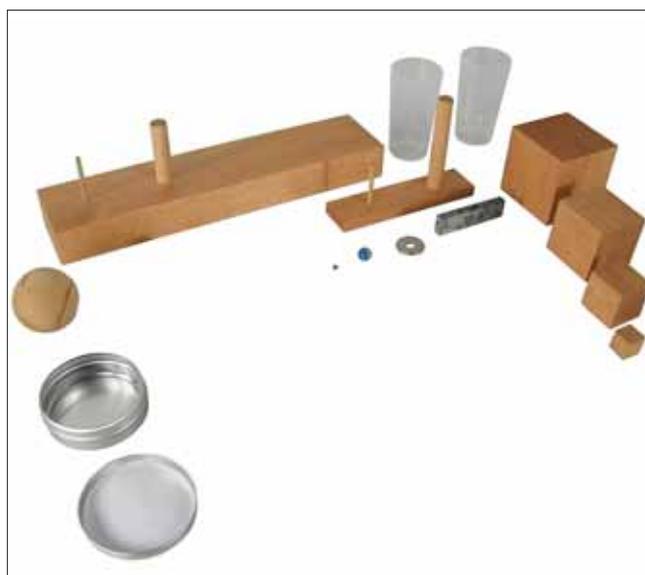


Рис. 1. Набор предметов для тестирования по шкале ARAT

каждый пациент в течение двухнедельного курса реабилитации ежедневно занимался индивидуальной лечебной гимнастикой с инструктором, включавшей не менее десяти целенаправленных тренировок функционально значимых движений в руке. Также у всех пациентов проводилось не менее десяти процедур массажа паретичных конечностей для временного снижения мышечного тонуса и пассивной чрескожной электронейростимуляции мышц руки.

В дополнение к классическим реабилитационным методикам в основной группе исследования проводилось не менее десяти тренировок по обучению кинестетическому ПД с использованием ИМК с визуальной и кинестетической обратной связью (с экзоскелетом кисти). В течение курса был использован неинвазивный ИМК, реализованный на методе распознавания реакции синхронизации/десинхронизации сенсо-моторных ритмов ЭЭГ во время выполнения пациентом инструкции к ПД. В случае успешного выполнения инструкции пациенту предъявлялась бимодальная обратная связь: визуальная с помощью объектов на экране компьютера и кинестетическая с помощью экзоскелета кисти, который приводил в движение пальцы руки. В зависимости от степени выраженности пареза в руке и спастичности, применялись различные модификации экзоскелетов, представлявших собой полимерные приводы для пальцев, приводившихся в движение по сигналу от ИМК (рисунок 2).

В зависимости от команды, предъявлявшейся с экрана монитора путём изменения цвета стрелок (рисунок 3),

Таблица 2. Сравнительная характеристика данных пациентов групп исследования

| Параметр | ИМК (n=35) | РТ (n=20) | P (Mann-Witney) |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Возраст (в годах) | 52,0 [36,0; 58,0] | 54,0 [24,0; 69,0] | >0,05 |
| Мужчин, n (%) | 24 (68) | 11 (55) | |
| Давность инсульта (мес) | 6,0 [4,0; 13,0] | 10,0 [3,0; 23,0] | >0,05 |
| ARAT (0-57) | 1,0 [0,0; 20,0] | 10,0 [0,0; 32,0] | >0,05 |
| Фугл-Мейера (0-126) | 71,0 [60,0; 92,0] | 84,0 [62,0; 98] | >0,05 |
| Эшворта (0-4) | 2,0 [1,0; 2,0] | 2,0 [1,0; 2,0] | >0,05 |

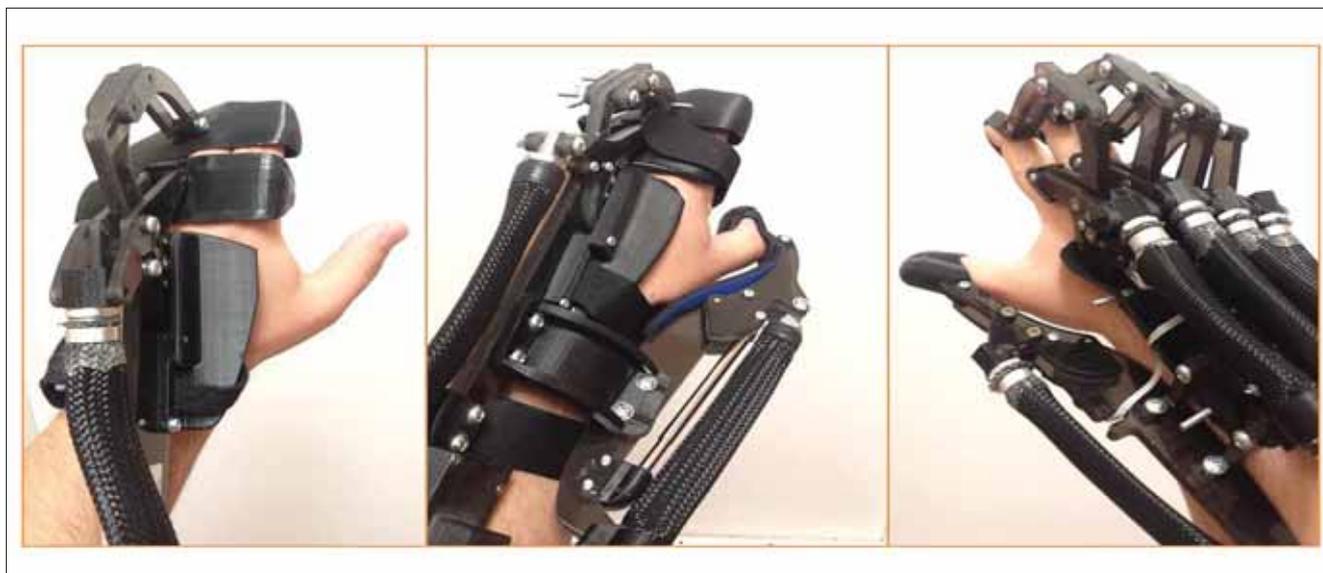


Рис. 2. Экзоскелеты кисти производства ООО «Нейроботикс», Зеленоград, Россия

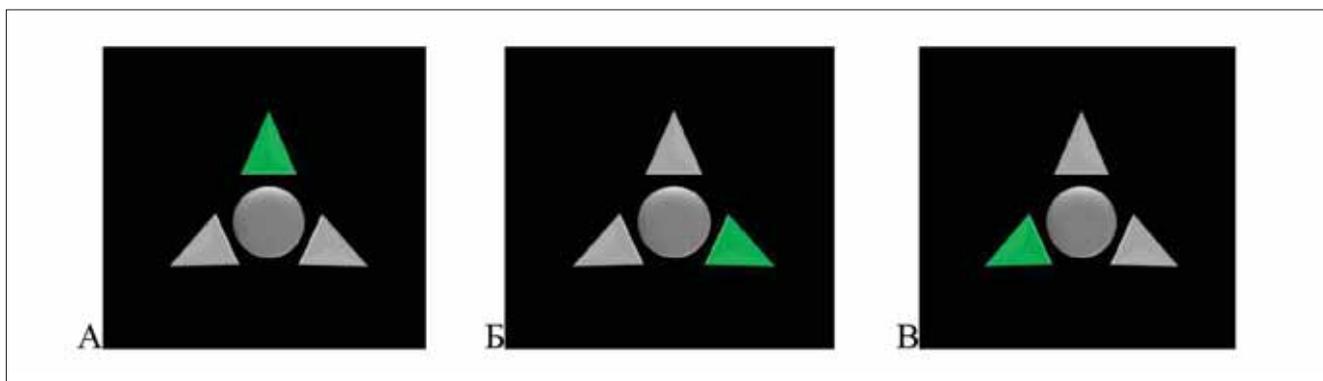


Рис. 3. Обозначения инструкций: А – «расслабиться», Б – «представление движения правой рукой», В – «представление движения левой рукой»



Рис. 4. Тренажёр для проведения роботизированной механотерапии «Амадео»

участник исследования должен был выполнять одну из трех инструкций: расслабиться, представлять движение левой или правой рукой.

В качестве задания предлагалось *кинестетически* представлять медленное разгибание пальцев кисти: то есть мысленно создавать комплексный образ ощущений, сопровождающих сокращение мышц, движение сегментов руки. При распознавании интерфейсом целевых паттернов ЭЭГ срабатывала обратная связь, в случае распознавания системой ИМК других задач или отсутствии такого распознавания предъявления обратной связи не

происходило.

Пациенты группы сравнения помимо классических реабилитационных методик получала десять процедур роботизированной механотерапии для кисти с помощью комплекса Амадео (Швейцария, 2011, tyromotion.com, рисунок 4).

Тренажёр представляет собой манипулятор, оснащённый пятью каретками с активными приводами для всех пальцев кисти, к которым с помощью магнитных фиксаторов прикреплялись пальцы пациента. Система реализует возможность проведения активных, пассив-

Таблица 3. Изменение значений показателей шкалы Фугл-Мейера у пациентов до и после тренировок в двух группах

| Параметр, баллы | | ИМК (n=35) | РТ (n=20) |
|--|-------|--------------------|---------------------|
| Фугл-Мейера (общий балл, 0-126) | До | 71,0 [60,0; 92,0] | 88,0 [78,5; 93,0] |
| | После | 75,0 [62,0; 105,0] | 100,0 [92,0; 102,0] |
| | P | 0,000409 | 0,00008 |
| Фугл-Мейера произвольные движения (0-66) | До | 17,0 [9,0; 36,0] | 23,0 [18,5; 27,0] |
| | После | 20,0 [13,0; 46,0] | 27,5 [22,5; 32,0] |
| | P | 0,000002 | 0,0009 |
| Фугл-Мейера проксимальные отделы (0-42) | До | 15,5 [7,0; 26,0] | 13,0 [13,0; 14,5] |
| | После | 17,5 [10,0; 32,0] | 14,5 [16,5; 15,5] |
| | P | 0,000002 | 0,0014 |
| Фугл-Мейера дистальные отделы (0-24) | До | 2,0 [1,0; 11,0] | 10,5 [4,5; 13,5] |
| | После | 4,0 [2,0; 17,0] | 13,0 [5,0; 18,0] |
| | P | 0,00006 | 0,003 |

ных, ассистирующих тренировок шаровидного захвата, разгибания пальцев и мелкой моторики (неполной симуляции щипковых захватов).

Упражнения проводились в виртуальной среде под контролем биологической обратной связи, реализованной с помощью оценки движения пальцев пациента датчиками, встроенными в конструкцию устройства и её трансляции в игровой сценарий в виде виртуальной руки, которая копировала движения пациента. Пациент получал инструкцию по выполнению движений пальцами кисти в соответствии с игровым сценарием предлагаемой сессии, в зависимости от поставленной инструктором по лечебной гимнастике реабилитационной цели. Каждая тренировка включала в себя выполнение игровых заданий, требовавших реализации шаровидного или щипкового захвата с предъявлением цифровой информации об успешности выполнения задания (качество, скорость), а также визуальной обратной связи (достижение игровой цели). Кроме того, во время пассивной механотерапии в случае плегии, на экране предъявлялась виртуальная обратная связь в виде аватара тренируемой руки, у которой синхронно с манипуляторами пальцев происходило движение сгибания и разгибания пальцев. Длительность каждой тренировки составляла 30 минут, в процессе выполнения двигательных задач пациент выполнял около

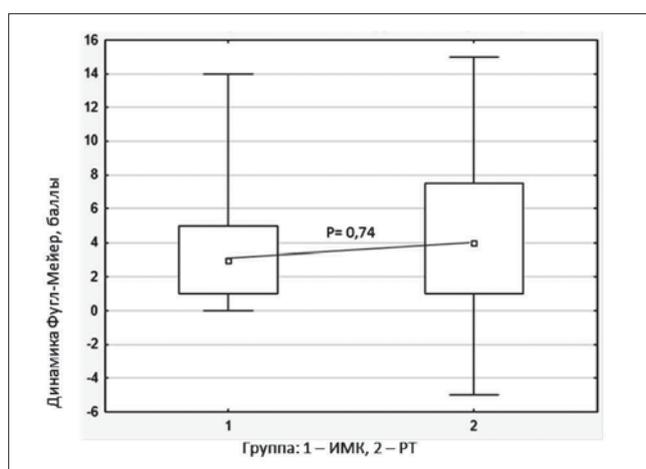


Рис. 4. Сравнение динамики показателей раздела «Произвольные движения руки» шкалы Фугл-Мейера

трёхсот движений.

Для статистической обработки полученных результатов была использована программа «STATISTICA 10.0». Проверка нормальности распределения признаков проводилась с применением критерия Шапиро – Уил-

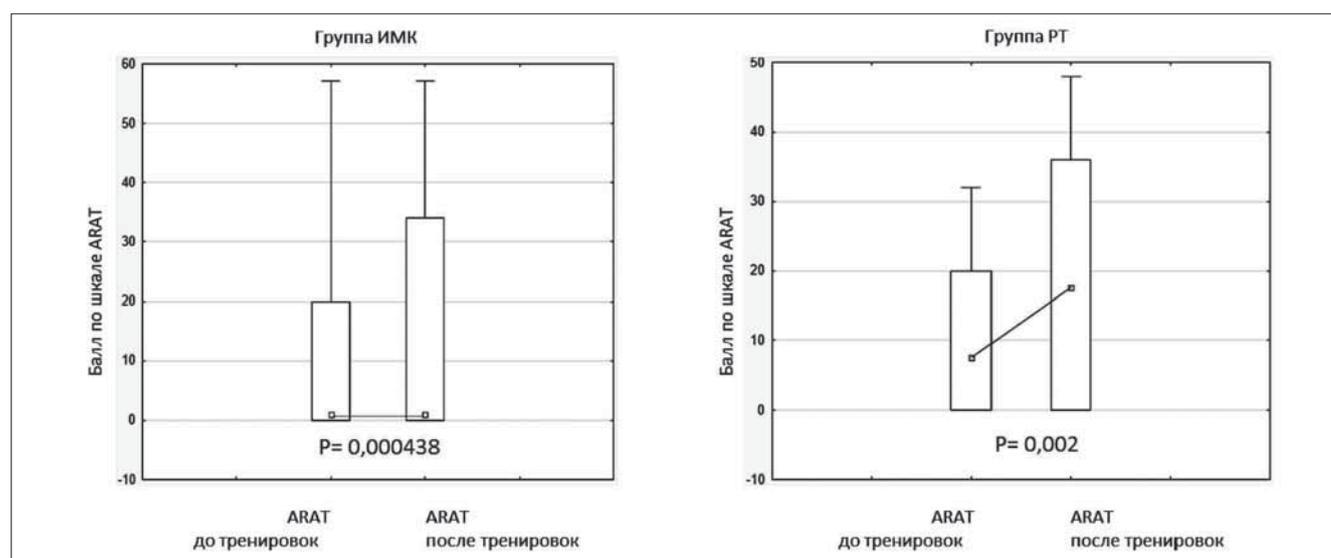


Рис. 5. Динамика показателей шкалы ARAT в группах исследования

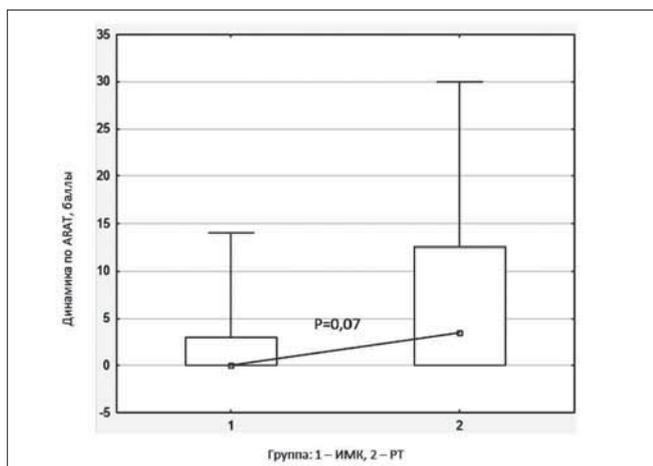


Рис. 6. Сравнение динамики показателей шкалы ARAT между группами

ка, основанием для использования методов непараметрической статистики стало выявление ненормальности распределения большинства количественных признаков.

Данные в тексте и таблицах представлены в виде медианы, первого и третьего квартилей (Me [1Q; 3Q]). Для сравнения количественных признаков двух несвязанных групп использовался критерий Манна-Уитни. С целью выявления корреляционных связей был применён коэффициент корреляции Спирмена. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

По завершении комплекса реабилитационных мероприятий статистический анализ показал значимое улучшение двигательной функции руки у пациентов обеих групп по шкале Фугл-Мейера в целом, а также отдельно по параметрам «произвольные движения» и «дистальные отделы» (таблица 3).

При оценке результатов улучшения показателей раздела «Произвольные движения» было статистически сопоставимым в обеих группах (рисунок 4).

Статистически значимое улучшение произвольных движений было отмечено как за счёт проксимальных,

так и дистальных отделов руки по данным шкалы Фугл-Мейера у всех пациентов без существенной разницы между группами.

В обеих группах отмечена положительная статистически значимая динамика по шкале ARAT в целом (рисунок 5).

Однако при сравнительном анализе было показано отсутствие статистически значимых отличий в степени динамики между группами (рисунок 6).

При анализе подразделов шкалы ARAT, содержащих детальную оценку движений в проксимальных и дистальных отделах руки, было выявлено статистически значимое улучшение шарового, цилиндрического и щипкового захватов, а также движений в проксимальных отделах руки у пациентов обеих групп (таблица 4).

Ни в одной из групп восстановление функции руки по шкалам Фугл-Мейера и ARAT не зависело от давности инсульта и возраста пациента. В обеих группах выявлены положительные корреляции средней силы между степенью восстановления функции руки по шкале Фугл-Мейера ($r=0,37, p < 0,05$), по шкале ARAT ($r=0,65, p < 0,05$) и исходной тяжестью двигательного дефицита.

Основываясь на результатах, представленных в проведённом исследовании, можно заключить, что технология ИМК-экзоскелет по ряду параметров не уступает по эффективности РТ: значимое улучшение двигательной функции руки наблюдается по шкалам Фугл-Мейера и ARAT в целом, а также по детализированным параметрам у пациентов обеих групп.

Такое наблюдение согласуется с результатами слепого рандомизированного исследования, в котором первый реабилитационный робот для руки – MIT-Manus использовался в системе ИМК и управление которым осуществлялось ЭЭГ-сигналами мозга, возникающими при ПД [3, 21]. В исследовании участвовало 26 больных с грубым постинсультным гемипарезом (показатели по шкале Фугл-Мейера варьировали от 4 до 61 баллов (в среднем 26,4, при максимальном значении баллов по шкале = 66); средний возраст 51,4 года; средняя давность инсульта 297,4 дней). Эффекты лечения сравнивались между группой больных, получавших ИМК+MIT-Manus (11 человек), и группой больных, получавших только робот-терапию с MIT-Manus (14 человек). Лечение продолжалось в течение 4 недель, оценка проводилась через 2, 4 и 12 недель

Таблица 4. Результаты оценки двигательной функции руки по шкале ARAT в динамике

| Параметр | | ИМК (n=35) | РТ (n=20) |
|-----------------------------------|-------|-----------------|------------------|
| ARAT (общий балл, 0-57) | До | 1,0 [0,0; 20,0] | 7,5 [0,0; 20,0] |
| | После | 1,0 [0,0; 34,0] | 17,5 [0,0; 36,0] |
| | P | 0,000438 | 0,002 |
| ARAT шаровой захват (0-18) | До | 0,0 [0,0; 10,0] | 3,5 [0,0; 10,5] |
| | После | 0,0 [0,0; 12,0] | 6,5 [0,0; 12,0] |
| | P | 0,011719 | 0,01 |
| ARAT щипковый захват (0-18) | До | 0,0 [0,0; 3,0] | 0,0 [0,0; 1,5] |
| | После | 0,0 [0,0; 11,0] | 0,0 [0,0; 6,0] |
| | P | 0,017961 | 0,02 |
| ARAT цилиндрический захват (0-12) | До | 0,0 [0,0; 6,0] | 1,0 [0,0; 5,0] |
| | После | 0,0 [0,0; 8,0] | 3,5 [0,0; 8,0] |
| | P | 0,005062 | 0,003 |
| ARAT проксимальные отделы (0-9) | До | 1,0 [0,0; 4,0] | 2,5 [0,0; 4,0] |
| | После | 1,0 [0,0; 6,0] | 3,5 [0,0; 6,0] |
| | P | 0,002218 | 0,01 |

с помощью шкалы Фугл-Мейера. Через 4 недели, по окончании реабилитационных сессий, в обеих группах наблюдалось значимое улучшение по шкале Фугл-Мейера: в среднем, балл по Фугл-Мейера увеличился на 6,3 (на 23,7%) в группе MIT-Manus и на 4,5 (на 17,1%) в группе ИМК+MIT-Manus ($p < 0,05$ в обоих случаях). Между группами значимых различий в улучшении не было ($p > 0,05$). Улучшение двигательной функции в течение первых 4 недель исследования в группе MIT-Manus наблюдалось у 10 из 14 пациентов (71,4%). В группе ИМК+MIT-Manus у 7 из 11 пациентов (63,6%) наблюдалось улучшение двигательной функции руки в течение первых 4 недель. Авторы отмечают, что интенсивность каждой тренировки в группе MIT-Manus была значимо выше, что могло повлиять на хоть и не значительное, но большее улучшение функции в данной группе (136 повторов движения за сессию в группе ИМК+MIT-Manus по сравнению с 1 040 повторов движения в группе MIT-Manus). Через 12 недель от начала лечения в группе ИМК- MIT-Manus у большего количества больных, у 7 из 11 (63,6%), отмечалось дальнейшее улучшение двигательных функций в руке по сравнению с группой MIT-Manus, в которой дальнейшее улучшение наблюдалось только у 5 из 14 больных (35,7%). В данном исследовании продемонстрировано значимое (на 17% по шкале Фугл-Мейера) улучшение двигательной функции после серии тренировок ИМК+MIT-Manus более чем у 60% пациентов, что сопоставимо с результатами намного более интенсивных тренировок с MIT-Manus без ИМК.

Следует отметить, что в сравнении с другими исследованиями, основным ограничением данной работы была относительно короткая продолжительность реабилитационного курса с применением ИМК, составлявшего в среднем 400 минут. Такая интенсивность занятий была связана с особенностями госпитализации и лечебным процессом в целом, однако была сопоставима с продолжительностью «классических» целенаправленных тренировок, составлявших основной протокол реабилитации у всех пациентов групп исследования.

Выводы

Согласно вышеприведенным результатам, в условиях интенсивной комплексной реабилитации технология ИМК-экзоскелет сопоставима по эффективности с роботизированной механотерапией, предоставляемой с помощью тренажера для кисти Амадео при одинаковом количестве занятий по показателям шкалы ARAT и шкалы Фугл-Мейера.

Данный подход рекомендуется как дополняющий традиционно используемые в двигательной реабилитации методы и может применяться у пациентов с давностью инсульта от 1 месяца, разной степенью выраженности пареза руки и степенью когнитивной функции, достаточной для выполнения задания по ПД. При этом исходная тяжесть двигательного дефицита в большей степени влияет на реабилитационный прогноз.

Следует подчеркнуть, что применение реабилитационного подхода, основанного на мысленном совершении движения с подкреплением через экзоскелет кисти, управляемый ИМК, возможно у пациентов с полным отсутствием движений в руке – когда применение активных двигательных методик ограничено или неприменимо.

Учитывая социальную значимость трудовых потерь после инсульта, являются крайне важными и необходимыми научно-исследовательские работы, направленные на развитие технологий в области нейрореабилитации. Технология «интерфейс мозг-компьютер» является одной из перспективных среди подходов к реабилитации после инсульта, что в частности подтверждается результатами проводимого исследования. Дальнейшее развитие технологии позволит создать продукт для использования в реальном секторе экономики и совершенствовать реабилитационную помощь пациентам трудоспособного возраста.

Список литературы:

1. Министерство здравоохранения РФ: Заболеваемость взрослого населения России в 2017 году. Статистические материалы, часть III. URL: <https://www.rosminzdrav.ru/>.
2. Harris, J.E. Strength training improves upper-limb function in individuals with stroke: a meta-analysis / J.E. Harris, J.J. Eng // *Stroke*. – 2010. – Vol. 41, N 1. – P. 36-40.
3. Winstein, C.J. Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery / C.J. Winstein, J. Stein, R. Arena et al. // *A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association / Stroke*. – 2016. – Vol. 47.
4. Мокиенко, О.А. Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности / О.А. Мокиенко, Н.А. Супонева, Г.А. Азиатская и др. // *Клинические рекомендации / под ред. О.А. Мокиенко, Н.А. Супоновой*. – М.: МЕДпресс-Информ, 2018 – С. 222.
5. Lang, C.E. Dose response of task-specific upper limb training in people at least 6 months poststroke: A phase II, single-blind, randomized, controlled trial / C.E. Lang, M.J. Strube, M.D. Bland et al. // *Annals of Neurology*. – 2016. – Vol. 80, N 3. – P. 342-54.
6. Pichiorri, F. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery / F. Pichiorri, G. Morone, M. Petti et al. // *Annals of Neurology*. – 2015. – Vol. 77, N 5. – P. 851-65.
7. Pollock, A. Top 10 research priorities relating to life after stroke--consensus from stroke survivors, caregivers, and health professionals / A. Pollock, B.S. George, M. Fenton, L. Firkins // *International Journal of Stroke*. – 2014. – Vol. 9, N 3. – P. 313-20.

References:

1. Ministry of Healthcare of the Russian Federation: Incidence of the adult population of Russia in 2017. Statistical materials, part III. URL: <https://www.rosminzdrav.ru/>.
2. Harris, J.E. Strength training improves upper-limb function in individuals with stroke: a meta-analysis / J.E. Harris, J.J. Eng // *Stroke*. – 2010. – Vol. 41, N 1. – P. 36-40.
3. Winstein, C.J. Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery / C.J. Winstein, J. Stein, R. Arena et al. // *A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association / Stroke*. – 2016. – Vol. 47.
4. Mokienko, O.A. Stroke in adults: central paresis of the upper limb / O.A. Mokienko, N.A. Suponeva, G.A. Asian and others // *Clinical recommendations / ed. O.A. Mokienko, N.A. Suponeva*. - M.: MEDpress-Inform, 2018 - P. 222.
5. Lang, C.E. Dose response of task-specific upper limb training in people at least 6 months poststroke: A phase II, single-blind, randomized, controlled trial / C.E. Lang, M.J. Strube, M.D. Bland et al. // *Annals of Neurology*. – 2016. – Vol. 80, N 3. – P. 342-54.
6. Pichiorri, F. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery / F. Pichiorri, G. Morone, M. Petti et al. // *Annals of Neurology*. – 2015. – Vol. 77, N 5. – P. 851-65.
7. Pollock, A. Top 10 research priorities relating to life after stroke--consensus from stroke survivors, caregivers, and health professionals / A. Pollock, B.S. George, M. Fenton, L. Firkins // *International Journal of Stroke*. – 2014. – Vol. 9, N 3. – P. 313-20.

8. Frolov, A.A. Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery / A.A. Frolov, D. Husek, E.V. Biryukova et al. // *Neural Network World.* – 2017. – Vol. 27. – P. 107–137.
9. Peurala, S.H. Effectiveness of constraint-induced movement therapy on activity and participation after stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials / S.H. Peurala, M.P. Kantanen, T. Sjögren et al. // *Clinical Rehabilitation.* – 2012. – Vol. 26, N 3. – P. 209–23.
10. Johansen-Berg, H. Correlation between motor improvements and altered fMRI activity after rehabilitative therapy / H. Johansen-Berg, H. Dawes, C. Guy et al. // *Brain.* – 2002. – Vol.125, pt. 12. – P. 31–42.
11. Kwakkel, G. Probability of regaining dexterity in the flaccid upper limb: impact of severity of paresis and time since onset in acute stroke / G. Kwakkel, B.J. Kollen, J. van der Grond et al. // *Stroke.* – 2003. – Vol. 34. – P. 2181–2186.
12. Morris, D.M. Constraint-induced movement therapy: characterizing the intervention protocol / D.M. Morris, E. Taub, V.W. Mark // *Europa medicophysica.* – 2006. – Vol. 42, N 3. – P. 257–68.
13. Butefisch, C.M. Mechanisms of use-dependent plasticity in the human motor cortex / C.M. Butefisch, B.C. Davis, S.P. Wise et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 2000. – Vol. 97. – P. 3661–3665.
14. Hebb, D.O. *The Organization of Behavior* / D.O. Hebb // New York : Wiley & Sons. – 1949. – P. 378.
15. Karni, A. Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning / A. Karni, G. Meyer, P. Jezzard, M.M. Adams, R. Turner, L.G. Ungerleider // *Nature.* – 1995. – Vol. 377. – P. 155–158.
16. Karni, A. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex / A. Karni, G. Meyer, C. Rey-Hipolito et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA.* – 1998. – Vol. 95. – P. 861–868.
17. Liepert, J. Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans / J. Liepert, H. Bauder, W. Show et al. // *Stroke.* – 2000. – Vol. 31, N 6. – P. 1210–6.
18. Van Peppen, R.P.S. The impact of physical therapy on functional outcomes after stroke: what's the evidence? / R.P.S. Van Peppen, G. Kwakkel, S. Wood-Dauphine et al. // *Clinical Rehabilitation.* – 2004. – Vol. 18, N 8. – P. 833–62.
19. Veerbeek, J.M. What Is the Evidence for Physical Therapy Poststroke? A Systematic Review and Meta-Analysis / J.M. Veerbeek, E. van Wegen, R. van Peppen et al. // *PLoS ONE.* – 2014. – Vol. 9, N 2. – P. 0087987.
20. Winstein, C. Motor control and learning principles for rehabilitation of upper limb movements after brain injury / C. Winstein, A.M. Wing, J. Whittall et al. // *Handbook of neuropsychology.* – 2003. – Vol. 9. – P. 79–138.
21. Hatem, S.M. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery / S.M. Hatem, G. Saussez, M. Della Faille et al. // *Frontiers in human neuroscience.* – 2016. – Vol. 10. – P. 442.
22. Royal College of Physicians / National clinical guideline for stroke // National Institute for Health and Clinical Excellence / *Neurology.* – 2016. – London : RCP.
23. Taub, E. Technique to improve chronic motor deficit after stroke / E. Taub, N.E. Miller, T.A. Novack et al. // *Archives of Physical Medicine Rehabilitation.* – 1993. – Vol. 74, N 4. – P. 347–54.
24. Taub, E. Alertness, level of activity, and purposive movement following somatosensory deafferentation in monkeys / E. Taub, R.D. Heitmann, G. Barro // *Annals of the New York Academy of Sciences.* – 1977. – Vol. 290. – P. 348–65.
25. Черникова, Л.А., ed. Восстановительная неврология: Инновационные технологии в нейрореабилитации. . 2016, «Медицинское информационное агентство». 344.
26. Hummel, F. Inhibitory control of acquired motor programmes in the human brain / F. Hummel, F. Andres, E. Altenmuller, et al. // *Brain Journal of Neurology.* – 2002. – Vol. 125. – P. 404–420.
27. Matsumoto, J. Modulation of mu rhythm desynchronization during motor imagery by transcranial direct current stimulation / J. Matsumoto, T. Fujiwara, O. Takahashi et al. // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation.* – 2010. – Vol. 7. – P. 27.
28. Soekadar, S.R. Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke / S.R. Soekadar, N. Birbaumer, M.W. Slutzky, L.G. Cohen // *Neurobiology of Disease.* – 2014. – Vol. 83. – P. 0969–9961.
29. Soekadar, S.R. Enhancing Hebbian learning to control brain oscillatory activity / S.R. Soekadar, M. Witkowski, N. Birbaumer, L.G. Cohen / *Cerebral Cortex.* – 2015. – Vol. 25. – P. 2409–2415.
30. Takemi, M. Event-related desynchronization reflects downregulation of intracortical inhibition in human primary motor cortex / M. Takemi, Y. Masakado, M. Liu, J. Ushiba // *Neurophysiology.* – 2013. – Vol. 110, N 5. – P. 1158–66.
31. Takemi, M. Sensorimotor event-related desynchronization represents the excitability of human spinal motoneurons / M. Takemi, Y. Masakado, M. Liu, J. Ushiba // *Neuroscience.* – 2015. – Vol. 25. – P. 58.
8. Frolov, A.A. Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery / A.A. Frolov, D. Husek, E.V. Biryukova et al. // *Neural Network World.* – 2017. – Vol. 27. – P. 107–137.
9. Peurala, S.H. Effectiveness of constraint-induced movement therapy on activity and participation after stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials / S.H. Peurala, M.P. Kantanen, T. Sjögren et al. // *Clinical Rehabilitation.* – 2012. – Vol. 26, N 3. – P. 209–23.
10. Johansen-Berg, H. Correlation between motor improvements and altered fMRI activity after rehabilitative therapy / H. Johansen-Berg, H. Dawes, C. Guy et al. // *Brain.* – 2002. – Vol.125, pt. 12. – P. 31–42.
11. Kwakkel, G. Probability of regaining dexterity in the flaccid upper limb: impact of severity of paresis and time since onset in acute stroke / G. Kwakkel, B.J. Kollen, J. van der Grond et al. // *Stroke.* – 2003. – Vol. 34. – P. 2181–2186.
12. Morris, D.M. Constraint-induced movement therapy: characterizing the intervention protocol / D.M. Morris, E. Taub, V.W. Mark // *Europa medicophysica.* – 2006. – Vol. 42, N 3. – P. 257–68.
13. Butefisch, C.M. Mechanisms of use-dependent plasticity in the human motor cortex / C.M. Butefisch, B.C. Davis, S.P. Wise et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 2000. – Vol. 97. – P. 3661–3665.
14. Hebb, D.O. *The Organization of Behavior* / D.O. Hebb // New York : Wiley & Sons. – 1949. – P. 378.
15. Karni, A. Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning / A. Karni, G. Meyer, P. Jezzard, M.M. Adams, R. Turner, L.G. Ungerleider // *Nature.* – 1995. – Vol. 377. – P. 155–158.
16. Karni, A. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex / A. Karni, G. Meyer, C. Rey-Hipolito et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA.* – 1998. – Vol. 95. – P. 861–868.
17. Liepert, J. Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans / J. Liepert, H. Bauder, W. Show et al. // *Stroke.* – 2000. – Vol. 31, N 6. – P. 1210–6.
18. Van Peppen, R.P.S. The impact of physical therapy on functional outcomes after stroke: what's the evidence? / R.P.S. Van Peppen, G. Kwakkel, S. Wood-Dauphine et al. // *Clinical Rehabilitation.* – 2004. – Vol. 18, N 8. – P. 833–62.
19. Veerbeek, J.M. What Is the Evidence for Physical Therapy Poststroke? A Systematic Review and Meta-Analysis / J.M. Veerbeek, E. van Wegen, R. van Peppen et al. // *PLoS ONE.* – 2014. – Vol. 9, N 2. – P. 0087987.
20. Winstein, C. Motor control and learning principles for rehabilitation of upper limb movements after brain injury / C. Winstein, A.M. Wing, J. Whittall et al. // *Handbook of neuropsychology.* – 2003. – Vol. 9. – P. 79–138.
21. Hatem, S.M. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery / S.M. Hatem, G. Saussez, M. Della Faille et al. // *Frontiers in human neuroscience.* – 2016. – Vol. 10. – P. 442.
22. Royal College of Physicians / National clinical guideline for stroke // National Institute for Health and Clinical Excellence / *Neurology.* – 2016. – London : RCP.
23. Taub, E. Technique to improve chronic motor deficit after stroke / E. Taub, N.E. Miller, T.A. Novack et al. // *Archives of Physical Medicine Rehabilitation.* – 1993. – Vol. 74, N 4. – P. 347–54.
24. Taub, E. Alertness, level of activity, and purposive movement following somatosensory deafferentation in monkeys / E. Taub, R.D. Heitmann, G. Barro // *Annals of the New York Academy of Sciences.* – 1977. – Vol. 290. – P. 348–65.
25. Chernikova, L.A., ed. Reconstructive neurology: Innovative technologies in neurorehabilitation. . 2016, Medical News Agency. 344.
26. Hummel, F. Inhibitory control of acquired motor programmes in the human brain / F. Hummel, F. Andres, E. Altenmuller, et al. // *Brain Journal of Neurology.* – 2002. – Vol. 125. – P. 404–420.
27. Matsumoto, J. Modulation of mu rhythm desynchronization during motor imagery by transcranial direct current stimulation / J. Matsumoto, T. Fujiwara, O. Takahashi et al. // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation.* – 2010. – Vol. 7. – P. 27.
28. Soekadar, S.R. Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke / S.R. Soekadar, N. Birbaumer, M.W. Slutzky, L.G. Cohen // *Neurobiology of Disease.* – 2014. – Vol. 83. – P. 0969–9961.
29. Soekadar, S.R. Enhancing Hebbian learning to control brain oscillatory activity / S.R. Soekadar, M. Witkowski, N. Birbaumer, L.G. Cohen / *Cerebral Cortex.* – 2015. – Vol. 25. – P. 2409–2415.
30. Takemi, M. Event-related desynchronization reflects downregulation of intracortical inhibition in human primary motor cortex / M. Takemi, Y. Masakado, M. Liu, J. Ushiba // *Neurophysiology.* – 2013. – Vol. 110, N 5. – P. 1158–66.
31. Takemi, M. Sensorimotor event-related desynchronization represents the excitability of human spinal motoneurons / M. Takemi, Y. Masakado, M. Liu, J. Ushiba // *Neuroscience.* – 2015. – Vol. 25. – P. 58.

32. Barclay-Goddard, R. Mental practice for treating upper extremity deficits in individuals with hemiparesis after stroke / R. Barclay-Goddard, T. Stevenson, L. Thalman, W. Poluha // *Stroke*. – 2011. – Vol. 42. – P. e574–e575.
33. Zimmermann-Schlatter, A. Efficacy of motor imagery in post-stroke rehabilitation: a systematic review / A. Zimmermann-Schlatter, C. Schuster, M.A. Puhan et al. // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2008. – Vol. 5:8.
34. Page, S.J. Mental practice in chronic stroke: results of a randomized, placebo-controlled trial / S.J. Page, P. Levine, A. Leonard // *Stroke*. – 2007. – Vol. 38, N 4. – P. 1293-7.
35. Page, S.J. Effects of mental practice on affected limb use and function in chronic stroke / S.J. Page, P. Levine, A. Leonard // *Archives of physical medicine and rehabilitation*. – 2005. – Vol. 86, N 3. – P. 399-402.
36. Ang, K.K. Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback / K.K. Ang, C. Guan, K.S. Chua et al. Conference proceedings - IEEE engineering in medicine and biology society. – 2010. – P. 5549-52.
37. Ang, K.K. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke / K.K. Ang, C. Guan, K.S. Phua et al. // *Frontiers in neuroengineering*. – 2014. – Vol. 7. – P. 30.
38. Ang, K.K. A Randomized Controlled Trial of EEG-Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke / K.K. Ang, K.S. Chua, K.S. Phua et al. // *Clinical EEG and neuroscience*. – 2015. – Vol. 46, N 4. – P. 10-20.
39. Ono, T. Brain-computer interface with somatosensory feedback improves functional recovery from severe hemiplegia due to chronic stroke / T. Ono, K. Shindo, K. Kawashima et al. // *Frontiers in neuroengineering*. – 2014. – Vol. 7. – P. 19.
40. Ramos-Murguialday, A., D. Broetz, M. Rea, L. Laer, O. Yilmaz, F.L. Brasil, G. Liberati, M.R. Curado, E. Garcia-Cossio, A. Vyziotis, W. Cho, M. Agostini, E. Soares, S. Soekadar, A. Caria, L.G. Cohen, N. Birbaumer, Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of neurology*, 2013. 74(1): p. 100-8.
41. Фролов, А.А. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки / А.А. Фролов, О.А. Мокиенко, Р.Х. Люкманов и др. // *Вестник Российского государственного медицинского университета*. – 2016. – № 2. – С. 17–25.
42. Мокиенко, О.А. Интерфейс мозг-компьютер как новая технология нейрореабилитации / О.А. Мокиенко, Л.А. Черникова, А.А. Фролов // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. – 2011. – Т. 5, № 3. – С. 46-52.
43. Buch, E.R. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke / E.R. Buch, C. Weber, L.G. Cohen, et al. // *Stroke*. – 2008. – Vol. 39, N 3. – P. 1-7.
44. Daly, J.J. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation / J.J. Daly, J.R. Wolpaw // *Lancet Neurology*. – 2008. – Vol. 7, N 11. – P. 32-43.
45. Shih, J.J. Brain-computer interfaces in medicine / J.J. Shih, D.J. Krusienski, J.R. Wolpaw // *Mayo Clinic Proceedings*. – 2012. – Vol. 87, N 3. – P. 268-79.
46. Фролов, А.А. Электрофизиологическая активность мозга при управлении интерфейсом мозг-компьютер, основанным на воображении движения / А.А. Фролов, Г.А. Азиатская, П.Д. Бобров, Р.Х. Люкманов и др. // *Физиология человека*. – 2017. – Т. 43, № 5. – С. 17-25.
47. Pfurtscheller, G. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles / G. Pfurtscheller, F.H. Lopes da Silva // *Clinical Neurophysiology*. – 1999. – Vol. 110, N 11. – P. 1842-57.
48. Doussoulin, S.A. Validation of "Action Research Arm Test" (ARAT) in Chilean patients with a paretic upper limb after a stroke / S.A. Doussoulin, S.R. Rivas, S.V. Campos // *Revista medica de Chile*. – 2012. – Vol. 140, N 1. – P. 59-65.
49. Fugl-Meyer, A.R. The post-stroke hemiplegic patient. A method for evaluation of physical performance / A.R. Fugl-Meyer, L. Jaasko, I Leyman et al. // *Journal of Rehabilitation Medicine*. – 1975. – Vol. 7. – P. 13-31.
50. Fugl-Meyer, A.R. Post-stroke hemiplegia assessment of physical properties / A.R. Fugl-Meyer // *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*. – 1980. – Vol. 7. – P. 85-93.
51. Saiote, C. Resting-state functional connectivity and motor imagery brain activation / C. Saiote, A. Tacchino, G. Bricchetto et al. // *Human Brain Mapping*. – 2016. – Vol. 37, N 11. – P. 3847-3857.
32. Barclay-Goddard, R. Mental practice for treating upper extremity deficits in individuals with hemiparesis after stroke / R. Barclay-Goddard, T. Stevenson, L. Thalman, W. Poluha // *Stroke*. – 2011. – Vol. 42. – P. e574–e575.
33. Zimmermann-Schlatter, A. Efficacy of motor imagery in post-stroke rehabilitation: a systematic review / A. Zimmermann-Schlatter, C. Schuster, M.A. Puhan et al. // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2008. – Vol. 5:8.
34. Page, S.J. Mental practice in chronic stroke: results of a randomized, placebo-controlled trial / S.J. Page, P. Levine, A. Leonard // *Stroke*. – 2007. – Vol. 38, N 4. – P. 1293-7.
35. Page, S.J. Effects of mental practice on affected limb use and function in chronic stroke / S.J. Page, P. Levine, A. Leonard // *Archives of physical medicine and rehabilitation*. – 2005. – Vol. 86, N 3. – P. 399-402.
36. Ang, K.K. Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback / K.K. Ang, C. Guan, K.S. Chua et al. Conference proceedings - IEEE engineering in medicine and biology society. – 2010. – P. 5549-52.
37. Ang, K.K. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke / K.K. Ang, C. Guan, K.S. Phua et al. // *Frontiers in neuroengineering*. – 2014. – Vol. 7. – P. 30.
38. Ang, K.K. A Randomized Controlled Trial of EEG-Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke / K.K. Ang, K.S. Chua, K.S. Phua et al. // *Clinical EEG and neuroscience*. – 2015. – Vol. 46, N 4. – P. 10-20.
39. Ono, T. Brain-computer interface with somatosensory feedback improves functional recovery from severe hemiplegia due to chronic stroke / T. Ono, K. Shindo, K. Kawashima et al. // *Frontiers in neuroengineering*. – 2014. – Vol. 7. – P. 19.
40. Ramos-Murguialday, A., D. Broetz, M. Rea, L. Laer, O. Yilmaz, F.L. Brasil, G. Liberati, M.R. Curado, E. Garcia-Cossio, A. Vyziotis, W. Cho, M. Agostini, E. Soares, S. Soekadar, A. Caria, L.G. Cohen, N. Birbaumer, Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of neurology*, 2013. 74(1): p. 100-8.
41. Frolov, A.A. Preliminary results of a controlled study of the effectiveness of IMC-exoskeleton technology in post-stroke paresis of the arm / A.A. Frolov, O.A. Mokienko, R.Kh. Lyukmanov et al. // *Bulletin of the Russian State Medical University*. – 2016. – No. 2. – P. 17–25.
42. Mokienko, O.A. The brain-computer interface as a new technology of neurorehabilitation / O.A. Mokienko, L.A. Chernikova, A.A. Frolov // *Annals of clinical and experimental neurology*. – 2011. – Т. 5, No. 3. – P. 46-52.
43. Buch, E.R. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke / E.R. Buch, C. Weber, L.G. Cohen, et al. // *Stroke*. – 2008. – Vol. 39, N 3. – P. 1-7.
44. Daly, J.J. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation / J.J. Daly, J.R. Wolpaw // *Lancet Neurology*. – 2008. – Vol. 7, N 11. – P. 32-43.
45. Shih, J.J. Brain-computer interfaces in medicine / J.J. Shih, D.J. Krusienski, J.R. Wolpaw // *Mayo Clinic Proceedings*. – 2012. – Vol. 87, N 3. – P. 268-79.
46. Frolov, A.A. Electrophysiological activity of the brain when controlling the brain-computer interface based on the imagination of movement / A.A. Frolov, G.A. Asian, P.D. Bobrov, R.Kh. Lyukmanov et al. // *Human Physiology*. – 2017. – Т. 43, No. 5. – P. 17-25.
47. Pfurtscheller, G. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles / G. Pfurtscheller, F.H. Lopes da Silva // *Clinical Neurophysiology*. – 1999. – Vol. 110, N 11. – P. 1842-57.
48. Doussoulin, S.A. Validation of "Action Research Arm Test" (ARAT) in Chilean patients with a paretic upper limb after a stroke / S.A. Doussoulin, S.R. Rivas, S.V. Campos // *Revista medica de Chile*. – 2012. – Vol. 140, N 1. – P. 59-65.
49. Fugl-Meyer, A.R. The post-stroke hemiplegic patient. A method for evaluation of physical performance / A.R. Fugl-Meyer, L. Jaasko, I Leyman et al. // *Journal of Rehabilitation Medicine*. – 1975. – Vol. 7. – P. 13-31.
50. Fugl-Meyer, A.R. Post-stroke hemiplegia assessment of physical properties / A.R. Fugl-Meyer // *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*. – 1980. – Vol. 7. – P. 85-93.
51. Saiote, C. Resting-state functional connectivity and motor imagery brain activation / C. Saiote, A. Tacchino, G. Bricchetto et al. // *Human Brain Mapping*. – 2016. – Vol. 37, N 11. – P. 3847-3857.

РЕЗЮМЕ

Наиболее частым последствием инсульта (ОНМК) являются двигательные нарушения различной степени выраженности, остающиеся одной из главных причин инвалидности у лиц трудоспособного возраста [1]. Наиболее высоким уровнем доказательности в отношении восстановления функции руки после ОНМК обладают комплексы лечебной гимнастики, включающие целенаправленные тренировки, в том числе – с ограничением движений в здоровой руке [2-4]. Одним из вариантов обеспечения таких тренировок является роботизированная механотерапия (РТ), расширяющая возможности реабилитации за счёт обеспечения большого количества повторов заданного движения, а также реализации обратной связи. Для пациентов с грубыми двигательными нарушениями методами выбора являются нефизические подходы, показывающие свою эффективность лишь при использовании вместе с основными мероприятиями: зеркальная терапия и мысленные тренировки с представлением движения (ПД) [2, 3, 5-7].

Контролировать процесс мысленного ПД позволяет технология интерфейс мозг-компьютер (ИМК), целью использования которой является предъявление обратной связи какой-либо модальности (например – кинестетической с помощью экзоскелета) во время тренировочного процесса для увеличения эффективности реабилитации [8, 9]. На данный момент недостаточно изучены клинические аспекты применения метода кинестетического ПД при использовании ИМК с экзоскелетом кисти в сравнении с РТ.

В данном исследовании приняли участие 55 пациентов с постинсультным парезом верхней конечности различной тяжести и давностью заболевания более 1 месяца. После скрининга и рандомизации всем пациентам был проведён курс реабилитации, помимо комплекса классических методов включавший тренировки ПД с использованием экзоскелета кисти под управлением ИМК (в основной группе) и РТ Амадео (в группе сравнения). До начала и по окончании тренировок были оценены показатели двигательной функции руки по клиническим шкалам АРАТ и Фулг-Мейера.

Согласно результатам работы, ни в одной из групп восстановление функции руки по шкалам Фулг-Мейера и АРАТ не зависело от давности ОНМК и возраста пациента. В обеих группах были выявлены положительные корреляции между степенью восстановления функции руки по двигательным шкалам и исходной тяжестью двигательного дефицита ($p < 0,05$). Статистически значимое улучшение двигательной функции как в проксимальных, так и дистальных отделах руки было отмечено у пациентов обеих групп, при этом объём динамики был сопоставим между группами исследования.

Таким образом, в условиях комплексной реабилитации и сопоставимом количестве тренировок улучшение двигательной функции в руке у пациентов с давностью перенесенного ОНМК более 1 месяца происходит одинаково эффективно как при обучении ПД под контролем ИМК с экзоскелетом кисти, так и при использовании РТ. При этом исходная тяжесть двигательного дефицита в большей степени влияет на реабилитационный прогноз.

Ключевые слова: двигательная реабилитация, инсульт, парез в кисти, представление движения, интерфейс мозг-компьютер, экзоскелет кисти, роботизированная терапия.

ABSTRACT

Motor function deficit due to stroke is one of the leading causes for disability among working-age population. The most effective evidence-based treatment strategies are task oriented exercise approaches including constrained-induced movement therapy. Robot-assisted training provides high amount of repetitions and feedback to patient. Adjuvant therapies such as mirror therapy and motor imagery show their effectiveness if used in combination with basic neurorehabilitation methods and are treatment of choice for patients with severe motor impairment. Brain-computer interfaces allow to control motor imagery as a process by giving different type of feedback (e.g. kinesthetic via exoskeleton) during training sessions. It is poorly known if kinesthetic motor imagery is more effective comparing to robot-assisted training as a part of post-stroke rehabilitation.

Materials and methods: 55 patients with arm paresis >1 month after stroke were enrolled in the current study. Screening and randomization were performed. Participants underwent rehabilitation treatment where BCI controlled motor imagery training in main group and robot-assisted training in control group were included. Motor function of the paretic arm was assessed using Action Research Arm Test (ARAT) and Fugl-Meyer Assessment (FMA) before and after intervention.

Results: Recovery of upper extremity motor function did not correlate with time since stroke and age of participants neither in main group, nor in control group. Correlations between change in motor scales scores and initial severity of motor deficit was shown in both groups ($p < 0,05$). Statistically significant improvement of motor function both in proximal and distal parts of the arm was found in both groups as well, and changes in motor scores were comparable.

Conclusions: Improvement of upper extremity motor function in patients more than one month post stroke was equally effective in case of BCI-controlled motor imagery training and robot-assisted training. Thereby initial severity of motor impairment affected recovery in a greater degree.

Keywords: neurorehabilitation, stroke, upper extremity paresis, motor imagery, brain-computer interface, hand exoskeleton, robot-assisted training.

Контакты:

Люкманов Роман Харисович. E-mail: xarisovich@gmail.com