

УДК 612.821

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ РУКИ ПОСЛЕ ИНСУЛЬТА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕЙСА “МОЗГ-КОМПЬЮТЕР”, УПРАВЛЯЮЩЕГО ЭКСОСКЕЛЕТОМ КИСТИ: ЭФФЕКТ ПОВТОРНЫХ ГОСПИТАЛИЗАЦИЙ

© 2020 г. А. А. Кондур^{1, *}, Е. В. Бирюкова^{2, 3, **}, А. А. Фролов^{2, 3},
П. Д. Бобров^{2, 3}, Л. Г. Турбина¹, С. В. Котов¹, Е. В. Зайцева¹

¹ГБУЗ МО Московский областной научно-исследовательский клинический институт
имени М.Ф. Владимирского, Москва, Россия

²ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

³ФГБОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет
имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия

*E-mail: annasams@mail.ru

**E-mail: ebiryukova@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.

После доработки 02.09.2019 г.

Принята к публикации 04.12.2019 г.

В настоящее время использование интерфейса “мозг-компьютер”, управляющего экзоскелетом кисти (ИМК + экзоскелет), является методом восстановления двигательной функции руки после инсульта с высоким уровнем доказательности, направленным на стимуляцию процессов нейропластичности в головном мозге. В работе анализируется эффект повторных курсов реабилитации с помощью процедуры ИМК + экзоскелет (от 2 до 9 мес. после первого курса) на восстановление двигательной функции руки у пациентов в позднем восстановительном периоде. В качестве метода оценки восстановления двигательной функции использовался биомеханический анализ движений пациента и клинические шкалы: *Fugl-Meyer*, *Action Research Arm Test* и *Medical Research Council Weakness Scale sum score*. В результате исследования установлено положительное влияние повторных курсов реабилитации ИМК + экзоскелет на восстановление двигательной функции как для пациентов с умеренным парезом в позднем восстановительном периоде, так и для пациентов с тяжелым парезом. Полученные данные могут быть полезны для выработки оптимального протокола реабилитационных процедур с использованием экзоскелета, управляемого ИМК, основанным на кинестетическом воображении движения.

Ключевые слова: интерфейс мозг-компьютер, экзоскелет кисти, двигательная функция, кинестетическое воображение движения, нейрореабилитация, биомеханический анализ движения, кинематический портрет, оценка двигательной функции.

DOI: 10.31857/S013116462003008X

Нарушение двигательной функции (ДФ) руки после инсульта формируются у 80% пациентов, у половины из них оно сохраняется пожизненно [1]. На сегодняшний день к методам восстановления ДФ с высоким уровнем доказательности относятся методы, направленные на стимуляцию процессов нейропластичности в головном мозге, что приводит к формированию новых нейронных связей взамен утраченных [2, 3]. Один из таких методов основан на кинестетическом воображении пациентом собственного движения [4, 5]. При регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ) во время воображения движения у здоровых испытуемых наблюдаются повторяемые специфические

изменения, в частности, десинхронизация μ -ритма [6], что позволяет классифицировать паттерны ЭЭГ, соответствующие данному состоянию [7]. Возможность такой классификации позволяет создать интерфейс “мозг-компьютер” (ИМК), который может приводить в движение экзоскелет, формируя тем самым проприоцептивную обратную связь, подкрепляющую намерение человека совершить движение.

В большинстве клинических исследований используется воображение разгибания пальцев и экзоскелеты кисти [8–12]. Это связано с обширным корковым представительством кисти, что позволяет с помощью кинестетического воображения

жения разгибания пальцев активировать значительную часть сенсомоторных областей коры головного мозга [13, 14].

В течение последних десяти лет активно ведутся клинические исследования по эффективности применения экзоскелета кисти, управляемого ИМК (ИМК + экзоскелет), у пациентов с парезом руки в результате инсульта [15–17]. В Российской Федерации реабилитационная процедура ИМК + экзоскелет прошла клинические испытания [12, 18–21] и находится на стадии внедрения в реабилитационные центры (регистрационное удостоверение от 10.10.2018 № РЗН 2018/7681).

Контролируемые клинические исследования продемонстрировали достоверное улучшение ДФ руки у пациентов, прошедших курс реабилитации ИМК + экзоскелет кисти [8–12]. Протоколы этих исследований различались между собой по длительности воображения в течение одной процедуры, по числу процедур и интервалов между ними. Структура протокола может влиять, однако, на эффективность реабилитации. Например, неясно, что предпочтительнее: интенсивный курс, состоящий из ежедневных тренировок в течение 2–3 нед. [12], или редкие тренировки раз в неделю в течение нескольких месяцев [22]. Интервал между процедурами напрямую связан с вопросом о сохранении эффекта процедур после того, как они завершены. Отдаленный эффект процедур — через 2 мес. [9] и через 6 мес. [23] после курса реабилитации — оценивается как сохраненный. Повторные курсы могут не только закреплять достигнутый результат, но и способствовать дальнейшему улучшению ДФ. Это показано, например, для случая больного с тяжелым парезом в позднем восстановительном периоде [24]. В настоящей работе анализируется эффект повторных интенсивных курсов реабилитации ИМК + экзоскелет (от 2 до 9 мес. после первого курса) на восстановление ДФ.

В качестве метода оценки восстановления ДФ используется биомеханический анализ движений пациента, зарегистрированных до и по окончании каждого из двух курсов. Как правило, общие нарушения ДФ в результате инсульта сопровождаются потерей способности выполнить изолированное движение в суставе, причем неспособность выполнить такое движение коррелирует с общим уровнем нарушения ДФ [25–27]. Этот факт послужил основой для выбора двигательных тестов: пациентам предлагалось выполнить изолированные движения, соответствующие семи степеням свободы руки; эти тесты составляли так называемый кинематический портрет пациента [28]. Для описания состояния ДФ использовались два параметра: среднеквадратичная угловая скорость изолированных движений и степень выраженности этих движений по сравнению с произвольными движениями в других суставах руки. Первый параметр характеризует силу мышц, приводящих

в движение суставы руки [29], а второй — координацию между движениями в суставах [30].

Проводилась также оценка ДФ с использованием общепринятых клинических шкал — *Fugl-Meyer (FM)*, *Action Research Arm Test (ARAT)* и *Medical Research Council Weakness Scale sum score (MRC-SS)*.

Положительное влияние повторных курсов реабилитации ИМК + экзоскелет на восстановление ДФ показано как для пациентов с умеренным парезом в позднем восстановительном периоде, так и для пациентов с тяжелым парезом. Полученные данные могут быть полезны для выработки оптимального протокола реабилитационных процедур с использованием экзоскелета, управляемого ИМК, основанным на кинестетическом воображении движения.

МЕТОДИКА

Исследование проводили на базе неврологического отделения Московского областного научно-исследовательского клинического института (МОНКИ) им. М.Ф. Владимирского с 2014 по 2017 гг. Повторные курсы на воображение движения с использованием ИМК + экзоскелет кисти проходили 11 пациентов. Возраст, пол, давность инсульта, его локализация, оценки ДФ и указание на наличие регистрации движения (кинематического портрета, КП) приведены в табл. 1. По данным магнитно-резонансной томографии (МРТ) у всех пациентов диагностировали корково-подкорковую локализацию инсульта.

Повторный курс восстановительного лечения проводили спустя 4.5 мес. [4, 6] после завершения 1-го курса (здесь и далее указаны медиана и квантили). Тяжесть пареза до начала 1-го курса оценивали по клинической шкале *FM*, исходя из максимальных 40 баллов; сумма баллов меньше 20 соответствовала умеренному парезу, больше 20 — тяжелому [31]. У 5 пациентов диагностировали умеренный парез руки (У) — 25 [21, 25] баллов по шкале *FM*; у 6-и — тяжелый (Т) — 9 [4.5; 12.5] баллов по шкале *FM*. В период 1-й госпитализации 4 пациента находились в раннем восстановительном периоде (меньше 6-и мес. после инсульта), остальные — в позднем (больше 6-и мес. после инсульта) или резидуальном (больше 12-и мес. после инсульта) периодах, в период 2-й госпитализации 1 пациент находился в раннем, а 10 пациентов — в позднем или резидуальном периодах инсульта.

Процедура реабилитации. Процедуру реабилитации с использованием ИМК + экзоскелет кисти проводили по ранее разработанному протоколу [12, 18]. Для управления ИМК пациент должен был воспроизводить три состояния: кинестетическое воображение разгибания пальцев левой или правой кисти и расслабление (покой). Инструкция на воспроизведение того или иного

Таблица 1. Характеристики пациентов, включенных в исследование

Пациент	Возраст	Пол	Давность инсульта перед 1-м курсом (мес.)	Интервал между 1-м и 2-м курсами (мес.)	Латерализация поражения	Тяжесть пареза по FM до 1-го курса: прокс/дист/координация	КП есть/нет
1	46	м	8	6	Л	17/10/2 (У)	+
2	53	м	3	4	Л	15/9/4 (У)	+
3	60	м	21	9	Л	15/12/4 (У)	+
4	62	м	3	7	П	20/15/4 (У)	+
5	59	м	8	4	П	19/12/1 (У)	+
6	53	м	4	3	Л	5/0/0 (Т)	+
7	42	ж	16	5	Л	10/0/2 (Т)	+
8	46	м	9	4	Л	1/0/0 (Т)	+
9	67	ж	2	2	П	13/7/0 (Т)	–
10	77	ж	7	4	П	10/3/0 (Т)	–
11	63	м	6	6	П	16/13/3 (У)	–

Примечание: У – умеренный парез, Т – тяжелый парез.

состояния отражалась на мониторе, установленном перед пациентом. В процессе воспроизведения состояний регистрировали ЭЭГ. Для распознавания воображаемого движения по регистрируемым паттернам ЭЭГ применяли Байесовский классификатор [32]. В случае успешного распознавания воображения разгибания пальцев экзоскелет выполнял это движение, и пальцы пассивно разгибались. Таким образом, пациент получал проприоцептивную обратную связь помимо зрительной, отражавшейся на экране монитора. Проводили 10 ежедневных занятий, каждое включало 3 сессии по 10 мин с перерывом 5 мин между сессиями.

В качестве показателя точности классификации использовали среднюю вероятность правильных распознаваний классификатором ИМК выполняемых ментальных заданий, которая при случайном распознавании трех заданий составляет 0.33. Для каждого пациента оценками его способности выполнять задачи процедуры во время конкретной госпитализации служили вероятности правильного распознавания соответствующих состояний во время той процедуры, для которой средняя вероятность правильных распознаваний была максимальной.

Методы оценки двигательной функции. Для 8 пациентов из 11, включенных в исследование, до и после каждого из двух курсов реабилитации регистрировали движения руки и проводили их биомеханический анализ.

В качестве двигательных тестов пациентам предлагали совершить изолированные движения, соответствующие каждой из степеней свободы руки: отведение-приведение (*abdw*) и сгибание-разгибание (*few*) в лучезапястном суставе, сгиба-

ние-разгибание (*fee*) и пронацию-супинацию (*pse*) в локтевом суставе, сгибание-разгибание (*fes*), отведение-приведение (*abds*) и вращение относительно продольной оси плеча (*rots*) в плечевом суставе. Пациенту давали инструкцию выполнять движение с максимальной амплитудой и удобной скоростью. Пациента просили избегать движений по степеням свободы, не входящих в инструкцию. Кроме этого, все тестовые движения выполнял пассивно врач, проводивший процедуру.

Активные и пассивные движения регистрировали с помощью 4-х датчиков электромагнитной системы *trakStar* (*Ascension Technology Corp.*, США), установленных на тыльной поверхности кисти, на дистальной части предплечья, на плече и на акромионе лопатки (рис. 1). По данным регистрации пассивных движений вычислялись индивидуальные положения осей вращения в суставах, а по данным регистрации активных движений – суставные углы, соответствующие всем степеням свободы руки [33]. Суставные скорости определяли численно по пятиочечной схеме с весами 1, 2, 4, 2, 1 [34]. Примеры зависимостей суставных скоростей от времени до и после курса реабилитации показаны на рис. 2.

Для оценки силы мышц, обеспечивающих движение по каждой степени свободы, использовали стандартное отклонение скорости ΔV по каждой степени свободы (рис. 2). Стандартное отклонение угловой скорости, пропорциональное ее изменению в ходе движения, может служить оценкой углового ускорения и, как следствие, величины мышечных сил в суставе [29]. Для оценки динамики изменения мышечных сил в ходе повторных госпитализаций ΔV нормировали на их значения до 1-й госпитализации.

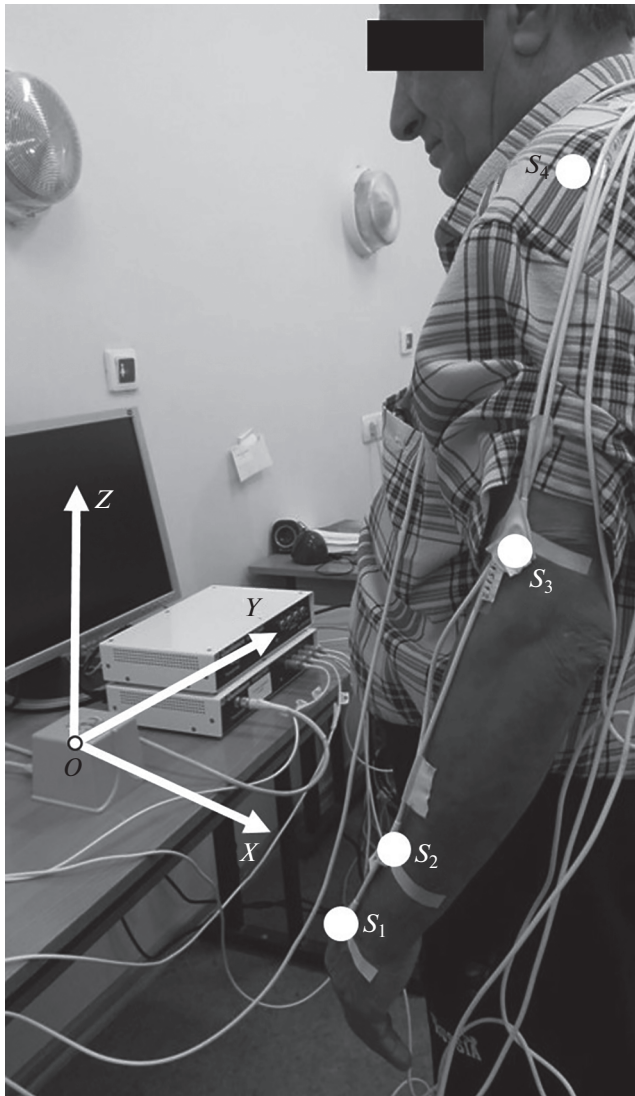


Рис. 1. Регистрация движений пациента с помощью электромагнитной системы *trakStar*.

S_1 – датчик на тыльной поверхности кисти, S_2 – датчик на дистальной части предплечья, S_3 – датчик на плече, S_4 – датчик на акромионе лопатки. $OXYZ$ – неподвижная система координат, связанная с базой, относительно которой регистрируются положения и ориентации систем координат, связанных с датчиками.

Для оценки координации движений в суставах использовали степень выраженности изолированного движения, которую вычисляли как отношение стандартного отклонения скорости движения, входящего в инструкцию, к сумме стандартных отклонений скоростей по всем степеням свободы. Изолированные движения в локтевом суставе – *fee* и *pse* – совершаются относительно анатомических осей вращения, определяемых строением суставных поверхностей блока плечевой кости и головок локтевой и лучевой костей [35]. Для движений *abdw* и *few* в лучезапястном суставе

таких удерживающих осей нет, поэтому при выполнении одного из этих движений, второе в той или иной степени присутствует. То же касается и плечевого сустава, т.к. он представляет собой шаровой шарнир, и движения *abds*, *fes* и *rots* также выполняются в той или иной степени одновременно. Для того, чтобы исключить влияние анатомического строения суставов и оценивать только функциональную способность совершить изолированное движение, далее для оценки силы мышц лучезапястного сустава использовали сумму $\Delta V_{\text{wrist}} = \Delta V_{\text{abdw}} + \Delta V_{\text{few}}$, а для оценки силы мышц плечевого сустава – сумму $\Delta V_{\text{shoulder}} = \Delta V_{\text{abds}} + \Delta V_{\text{fes}} + \Delta V_{\text{rots}}$ (рис. 2).

Таким образом, если, например, по инструкции испытуемому предлагали выполнить изолированное сгибание–разгибание в локтевом суставе, то степень изолированности этого движения определяли по формуле:

$$I_{\text{fee}} = \Delta V_{\text{fee}} / (\Delta V_{\text{wrist}} + \Delta V_{\text{fee}} + \Delta V_{\text{pse}} + \Delta V_{\text{shoulder}}) \times 100\%.$$

Оценку ДФ руки проводили в начале и в конце каждого восстановительного курса также с использованием *клинических шкал Fugl-Meyer* [31], *ARAT* [36] и *MRC-SS* [37].

Использовали только те показатели шкалы *FM*, которые оценивают активные движения в проксимальных (5 пунктов раздела II, кроме пожимания плеч, все 3 пункта каждого из разделов III–V) и дистальных отделах руки (3 пункта для активных движений раздела VII), а также координацию (3 пункта раздела IX). Таким образом, для оценки ДФ в нашей работе использовали 20 пунктов шкалы *FM*, и максимально возможное число баллов составляет 40. Свыше 20 баллов набирали пациенты с умеренным парезом, менее 20 баллов – с грубым парезом руки (меньше 3-х баллов по шкале *MRC-SS* соответствует грубому парезу, больше 2-х – умеренному). Степень захвата кисти оценивали по шкале *ARAT* ($\text{max} = 57$ баллов) и по *ARAT* с исключением раздела, отвечающего за крупные движения руки, с 1–3 пункт – *ARAT* (I–III), максимальное количество баллов – 48.

Статистический анализ. Для сравнения биомеханических параметров оценки ДФ в ходе госпитализаций использовали критерий Стьюдента (*t-test*, $p < 0.05$) и дисперсионный анализ с повторяющимися измерениями (*ANOVA repeated measures*). Для сравнения оценок ДФ по шкале *FM* использовали непараметрический критерий Уилкоксона для сравнения зависимых выборок, $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биомеханический анализ движений пациентов. Сравнение стандартных отклонений угловых скоростей – величин ΔV – до и после 1-й госпита-

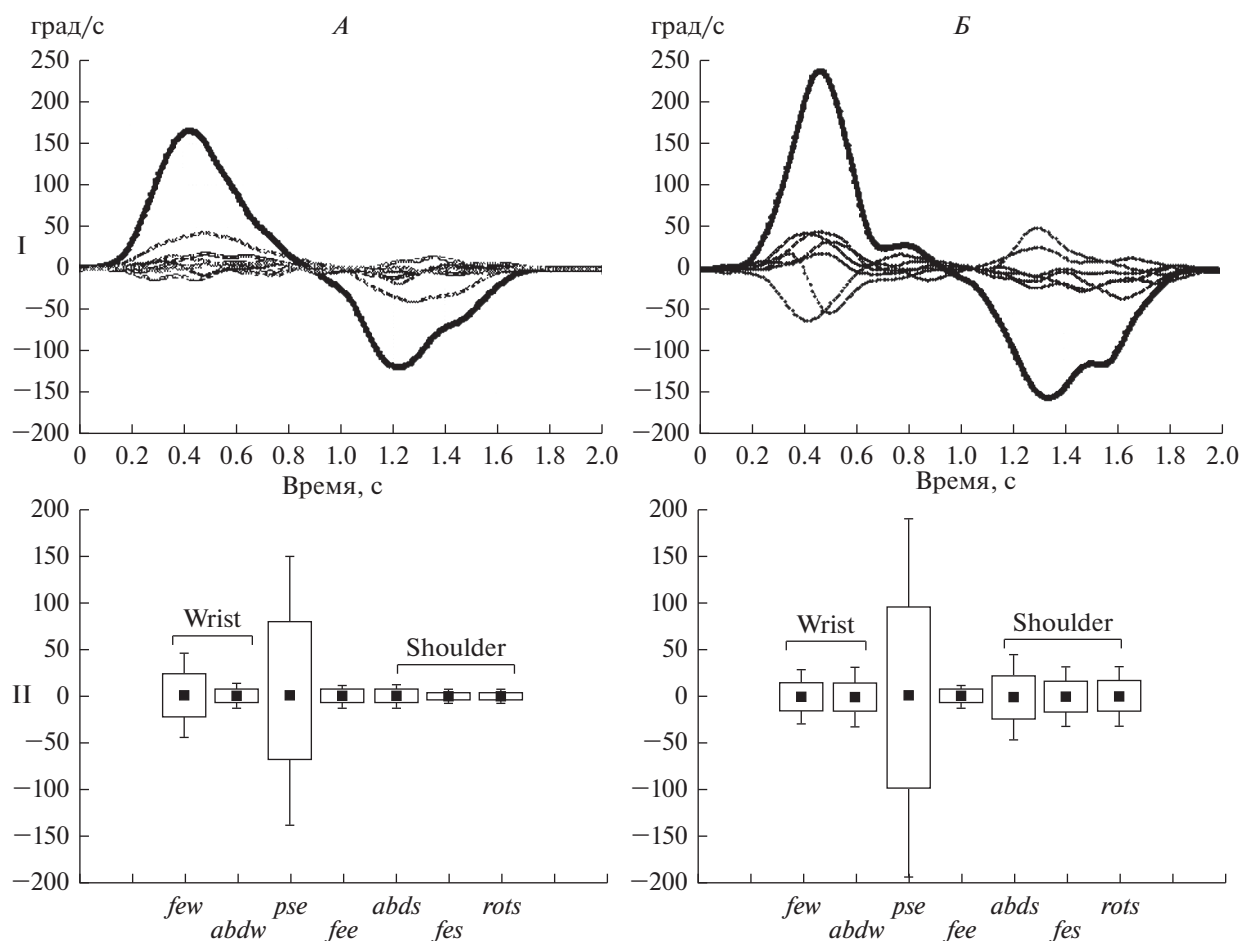


Рис. 2. Степень выраженности изолированного движения в терминах угловых скоростей (в град/с) по каждой степени свободы руки.

A – до курса реабилитации, *Б* – после курса реабилитации. *I* – зависимости суставных скоростей от времени – во время выполнения изолированной пронации-супинации пациентом с умеренным парезом руки. Жирной линией показана угловая скорость пронации-супинации, тонкими линиями – угловые скорости по другим степеням свободы руки (*few*, *abdw*, *fee*, *abds*, *fes*, *rots*). *II* – стандартные отклонения угловых скоростей по всем степеням свободы руки: *few* – сгибание-разгибание в лучезапястном суставе, *abdw* – отведение-приведение в лучезапястном суставе, *pse* – пронация-супинация предплечья, *fee* – сгибание-разгибание в локтевом суставе, *abds* – отведение-приведение, *fes* – сгибание-разгибание, *rots* – вращение относительно продольной оси плеча в плечевом суставе.

лизации показало их статистически достоверное увеличение для движений в локтевом суставе – сгибания-разгибания ($p = 0.04$) и пронации-супинации ($p = 0.02$) (рис. 3, *A*). Сравнение величин ΔV до и после 2-й госпитализации показало их статистически достоверное увеличение для движений в лучезапястном ($p = 0.001$) и плечевом ($p = 0.02$) суставах (рис. 3, *B*). Сравнение величин ΔV до 1-й госпитализации и после 2-й показывает их статистически достоверное увеличение по всем степеням свободы руки: $p = 0.01$ (*wrist*), $p = 0.04$ (*pse*), $p = 0.02$ (*fee*) и $p = 0.02$ (*shoulder*) (рис. 3, *B*).

Стандартные отклонения скоростей до 1-й госпитализации были выше у пациентов с умеренным парезом, чем у пациентов с тяжелым парезом. Для всех степеней свободы руки, кроме плеча, это различие было статистически достоверно.

Средние значения для лучезапястного сустава составляли 96.7 град/с для умеренного пареза и 30.8 град/с для тяжелого пареза ($p = 0.002$); для пронации-супинации в локте это соотношение было 77.0 и 18.1 град/с ($p = 0.004$); для сгибания-разгибания в локте – 80.0 и 44.5 град/с ($p = 0.016$); для плеча – 134.7 и 104.8 град/с ($p = 0.283$). Сравнение ΔV до 1-й и после 2-й госпитализаций показывает больший эффект для пациентов с тяжелым парезом по сравнению с умеренным для всех степеней свободы, кроме сгибания-разгибания в локте. В результате двух госпитализаций величина ΔV в лучезапястном суставе в среднем возросла на 60% для пациентов с умеренным парезом и на 87% для пациентов с тяжелым парезом (рис. 4). Для пронации-супинации это соотношение было 18 и 152%, а для плеча – 52 и 149%. Для сгибания-

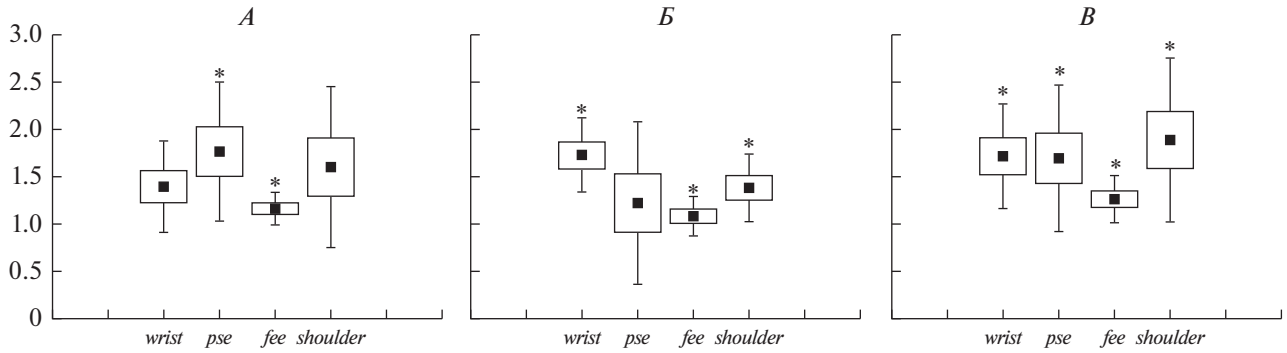


Рис. 3. Стандартные отклонения угловых скоростей ΔV движений в лучезяпестном суставе (*wrist*), пронации-супинации (*pse*) и сгибания-разгибания (*fee*) в локтевом суставе и движений в плечевом суставе (*shoulder*). *A* – изменение величин ΔV после 1-го курса относительно их значений до 1-го курса; *B* – изменение величин ΔV после 2-го курса относительно их значений до 2-го курса; *C* – изменение величин ΔV после 2-го курса относительно их значений до 1-го курса. * – статистически значимые увеличения ΔV .

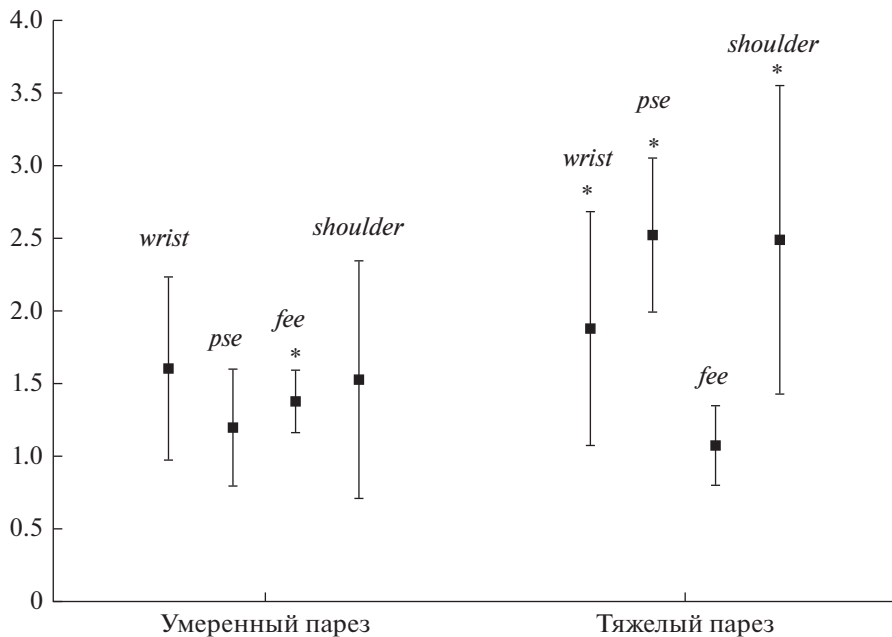


Рис. 4. Изменение величин ΔV после 2-го курса относительно значений ΔV до 1-го курса для случаев умеренного и тяжелого парезов (результаты анализа *ANOVA*). Показаны изменения ΔV для движений в лучезяпестном суставе (*wrist*), для пронации-супинации предплечья (*pse*), сгибания-разгибания в локтевом суставе (*fee*) и для движений в плечевом суставе (*shoulder*). * – статистически значимые увеличения ΔV .

разгибания в локте это соотношение было обратным — 37 и 6% (рис. 4). Для умеренного пареза возрастание ΔV было статистически достоверным только для сгибания-разгибания в локте, а для тяжелого пареза — для всех степеней свободы, кроме сгибания в локте (рис. 4).

Степень выраженности изолированного движения перед 1-й госпитализацией в целом была низкой, однако выше у пациентов с умеренным парезом, чем у пациентов с тяжелым парезом. Это различие было достоверно только для движений в

лучезяпестном суставе (*wrist*). Средние значения для этого сустава были 39% для умеренного пареза и 10% для тяжелого, для *pse* это соотношение было 40 и 20%, для *fee* — 36 и 23%, для *shoulder* — 25 и 18%. Для пациентов с умеренным парезом средние значения степени выраженности изолированного движения возрастали (статистически недостоверно) после для *wrist* и *shoulder*, а для пациентов с тяжелым парезом — для *pse* и *shoulder* (табл. 2). Это возрастание было наибольшим для

Таблица 2. Степень выраженности изолированного движения до и после 1-го и 2-го курса ИМК + экзоскелет кисти

Парез	Степень свободы	До 1-го курса	После 1-го курса	До 2-го курса	После 2-го курса
Умеренный	<i>wrist</i>	39%	41%	37%	43%
	<i>shoulder</i>	23%	26%	26%	28%
Тяжелый	<i>pse</i>	20%	23%	23%	33%
	<i>shoulder</i>	15%	18%	18%	22%

Таблица 3. Динамика показателей ДФ руки в течение двух госпитализаций

Клиническая шкала	1-я госпитализация		2-я госпитализация	
	до	после	до	после
<i>FM</i> – сумма баллов по всем тестам активных движений	20 [11; 25]	20 [11; 27]	22.5 [12; 27]	24.5 [14; 31]
<i>FM</i> – проксимальный отдел	15 [10; 17]	16 [11; 20]*	15 [10; 21]	15.5 [12; 23]
<i>FM</i> – дистальный отдел	2 [0; 3]	2 [0; 4]	2 [2; 4]	2.5 [2; 4]
<i>FM</i> – координация	2 [0; 4]	2 [0; 5]	1.5 [0; 3]	4 [0; 5]
<i>ARAT</i>	4 [0; 29]	7 [0; 43]*	4 [2; 44]	7 [0; 48]*
<i>ARAT</i> (I-III)	0 [0; 24]	2 [0; 38]*	2 [2; 37]	4 [0; 42]*
<i>MRC-SS</i>	2 [1; 3]	3 [1; 4]*	2 [2; 4]	3 [2; 4]*

Примечание: данные представлены в виде медианы и квартилей 25%; 75% значений выборки. * – статистически достоверные изменения параметров ($p < 0.05$).

пронации-супинации пациентов с тяжелым парезом.

Оценка ДФ с помощью клинических шкал. У всех пациентов, включенных в исследование, было отмечено улучшение ДФ по завершении как первого, так и повторного курсов восстановительного лечения (табл. 3).

Шкала *FM* показала статистически значимое улучшение ДФ для проксимальных отделов после 1-го курса и небольшое статистически незначимое улучшение после 2-го. Для дистального отдела шкалы *FM* (раздел VII), так же, как и для координации (раздел IX), улучшение ДФ, хоть и статистически незначимое, получено только после 2-го курса (табл. 3).

Достоверное улучшение ДФ кисти было отмечено по шкале *ARAT* и *MRC-SS*. В период между курсами наблюдалось снижение показателей по шкале *ARAT* с 7 [0; 43] до 4 [2; 44] баллов. Однако, после повторного курса показатели ДФ снова увеличивались до уровня, достигнутого в результате 1-го курса (табл. 3).

При сравнительном анализе показателей функции захвата в кисти по шкале *ARAT* (разделы I–III) улучшение также наблюдалось после обеих госпитализаций. Статистически значимое улучшение показателей было достигнуто после 1-го курса: с 0 [0; 24] до 2 [0; 38] баллов ($p = 0.03$), после повторного курса отмечалось повышение показателей захвата в кисти с 2 [2; 37] до 4 [0; 42] баллов ($p = 0.02$) (табл. 3).

У всех пациентов с умеренным парезом имело место стабильное улучшение функции захвата в кисти по шкале *ARAT* как после 1-го, так и после 2-го курса (рис. 5). После прекращения тренировок, между концом 1-го курса и началом 2-го отмечалось небольшое снижение этих показателей. У пациентов с тяжелым парезом улучшение функции захвата отмечалось у четырех из пяти пациентов (рис. 5).

Оценка успешности воображения движений. Максимальные значения средней вероятности правильных распознаваний варьировали от 0.54 до 0.78 в зависимости от пациента. Отличия между вероятностями распознаваний у пациентов с умеренным и тяжелым парезом были статистически недостоверны.

Сравнение вероятностей распознавания 1-й и 2-й госпитализаций у пяти пациентов с умеренным парезом показало увеличение вероятности распознавания паретичной руки у трех пациентов, вероятности распознавания покоя у двух и вероятности распознавания сохранной руки у одного пациента.

Сравнение вероятностей распознавания 1-й и 2-й госпитализаций у трех пациентов с тяжелым парезом показало увеличение вероятности распознавания паретичной руки у двух пациентов и вероятности распознавания покоя у всех пациентов. Средние вероятности распознавания у всех пациентов с тяжелым парезом во 2-й госпитализации были выше, чем в первой. Вероятности

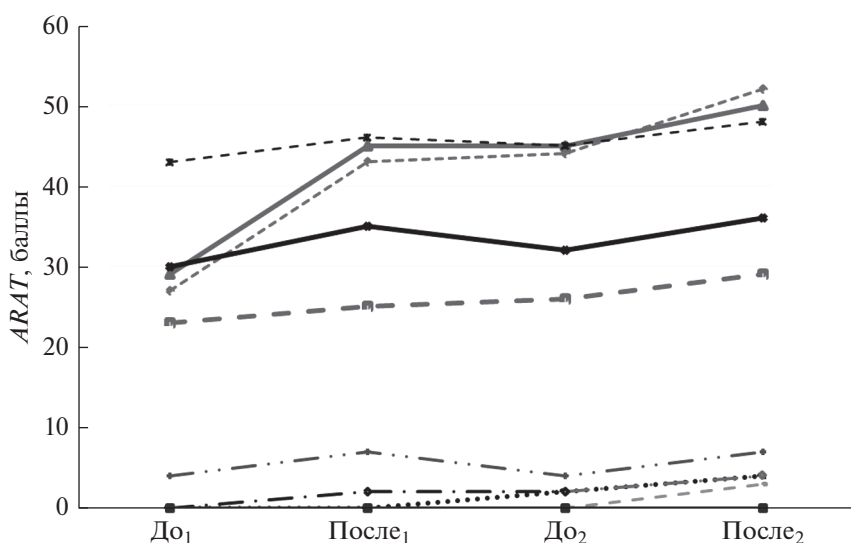


Рис. 5. Оценка ДФ по шкале ARAT до 1-го, после 1-го, до 2-го и после 2-го курсов ИМК + экзоскелет. Для 11-и пациентов, включенных в исследование, на рисунке использованы разные типы линий.

распознавания сохранной руки у всех пациентов с тяжелым парезом снизились.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Биомеханический анализ и клинические шкалы. Реабилитационные процедуры, использующие управление экзоскелетом конечности с помощью нейрокомпьютерных интерфейсов, изначально предполагались для пациентов с грубым двигательным дефицитом в поздние восстановительные сроки инсульта, когда воображение движения является единственным возможным активным методом участия пациента в реабилитации. Однако, было показано, что и в ранние периоды восстановления (меньше 6 мес. после инсульта) идеомоторные тренировки способствуют восстановлению ДФ и могут быть использованы как адыювантный метод к стандартной двигательной реабилитации [38]. В настоящем исследовании влияния повторных курсов реабилитации на восстановление ДФ после инсульта представлены пациенты с умеренным и тяжелым парезом, находящиеся как в раннем, так и в позднем восстановительных периодах (табл. 1).

Признание того или иного метода и/или протокола реабилитации неэффективным часто связано не с самим методом, а с недостаточной точностью оценки результата восстановления ДФ [39]. Биомеханический анализ позволяет дать численную объективную оценку ДФ [40] и, тем самым, адекватно описать двигательные изменения, произошедшие в результате реабилитационных процедур. Важно, что биомеханический анализ описывает субклинические изменения, которые не

могут быть выявлены клиническими шкалами в силу их недостаточной чувствительности [41].

Преимущество метода биомеханического анализа состоит, в частности, в том, что он дает оценку движений в каждом суставе руки, а также координацию между ними. Оценка результатов последовательных курсов реабилитации ИМК + экзоскелет показала, что после 1-го курса увеличились скорости движений в локтевом суставе (*pse* и *fee*), а в результате 2-го — скорости движений в лучезапястном и плечевом суставах (*wrist* и *shoulder*) (рис. 2, А, Б). Эти результаты находятся в соответствии с данными по уменьшению (по сравнению с нормой) числа двигательных синергий после инсульта и постепенному увеличению их числа в ходе восстановительного лечения [42]. Анализ ЭЭГ показал, что уменьшение числа синергий, или их слияние, после инсульта связано с существенным перекрытием кортикальных представительства суставов руки [43]. Это перекрытие, в свою очередь, объясняется тем, что после инсульта увеличивается активность интактных зон пораженного полушария [44]. В работе [45] на основе анализа ЭМГ-активности восьми мышц верхней конечности выделены кластеры, описывающие двигательные синергии руки у пациентов с корково-подкорковым поражением после инсульта. Выделенные кластеры включают синергии отдельных суставов: лучезапястного, локтевого и плечевого (рис. 3, В и 5, А из работы [45]). Возможно, в ходе 1-го курса реабилитации восстановились кластеры активности мышц локтевого сустава, а в ходе 2-го — кластеры активности мышц кисти и плеча. Второй восстановительный курс был, таким образом, необходим для активации

новых кластеров двигательных синергий и, как следствие для дальнейшего улучшения ДФ [45].

Относительное увеличение оценки мышечных сил было больше у пациентов с тяжелым парезом, чем у пациентов с умеренным парезом (рис. 4). При этом перед первым курсом абсолютные значения оценок мышечной силы были достоверно выше у пациентов с умеренным парезом. Таким образом, эффективность процедур ИМК + экзоскелет оказалась выше для пациентов с тяжелым парезом, что находится в соответствии с ранее полученными данными [11, 22].

Известно, что силовые тренировки после инсульта способствуют восстановлению двигательных синергий [46, 47]. Следовательно, возрастание силы мышц должно вести и к улучшению координации между суставами. Выраженность изолированного движения в результате процедур возросла незначительно и не для всех движений, включенных в кинематический портрет (табл. 2, средние значения). Эти значения после 2-й госпитализации были выше, чем после 1-й, что показывает эффективность повторного курса лечения.

Увеличение силы мышц, обнаруженное в результате биомеханического анализа, находится в соответствии с достоверным увеличением силы руки по шкале *MRC-SS* (табл. 3), однако эта шкала дает лишь общую оценку силы руки, не позволяя делать выводов о силе мышц отдельных суставов.

Статистически значимое улучшение ДФ проксимального отдела руки по шкале *FM* получено только для 1-й госпитализации (табл. 3). Биомеханический анализ показал улучшение для обеих госпитализаций, причем в 1-й – для движений в локте, а для 2-й – для движений в плече (рис. 2, А, Б). Можно предположить, что движения в локте влияют на оценку ДФ проксимального отдела по шкале *FM* в большей степени, чем движения в плече. Шкала *FM* не показала статистически достоверных улучшений ДФ проксимального отдела руки для 2-й госпитализации (табл. 3), а биомеханический анализ выявил достоверное улучшение силы мышц лучезапястного сустава (*wrist*) и в результате 2-й госпитализации (рис. 3, Б) и по сумме двух госпитализаций (рис. 3, В). Это несоответствие может быть связано с малым числом тестов *FM*, касающихся активных движений в запястье (всего 3) и свидетельствует о меньшей надежности оценки ДФ дистального отдела, чем проксимального отдела.

Таким образом, преимущество биомеханического анализа перед клиническими шкалами состоит в его чувствительности к изменениям ДФ, касающихся отдельных суставов руки. Однако возможность его применения в клинических исследованиях весьма ограничена, т.к. подразумевает наличие оборудования для регистрации движения и дополнительного времени врача для интерпретации полученных данных. Клинические

шкалы не требуют специального оборудования и сложной обработки, поэтому, несмотря на низкую чувствительность, широко применяются в клинических исследованиях [48]. Шкала *FM* применялась и в нашем предыдущем исследовании, которое было направлено в основном на оценку потенциала ресоциализации постинсультных больных после повторных госпитализаций [49]. Для повышения объективности оценок по клиническим шкалам, исследуют корреляции между результатами биомеханического анализа и данными шкал [50, 51].

Вероятность распознавания. Вероятность распознавания состояний, предъявляемых пациенту в процедуре, характеризует его способность к кинестетическому воображению движения и, как следствие, эффективность его реабилитации. Показано, что эта способность не зависит от поражения мозговых структур, связанных с инсультом: распределения вероятностей распознавания у здоровых испытуемых и постинсультных больных сопоставимы друг с другом [52]. Это подтверждается и данными настоящего исследования: не обнаружено статистически достоверных различий между вероятностями распознавания у пациентов с умеренным и тяжелым парезом.

В процессе 2-й госпитализации пациенты уже освоили трудное задание кинестетического воображения движений, и можно было бы ожидать увеличения вероятности распознавания состояний, предъявляемых в процедуре. Однако увеличение имело место не для всех пациентов и касалось в основном распознавания состояния покоя и распознавания раскрытия паретичной кисти. По этим данным трудно судить об обучении кинестетическому воображению движения, однако можно заключить, что повторные курсы ИМК + экзоскелет могут быть более эффективными с точки зрения работоспособности пациента в ходе процедуры.

Протокол реабилитации. Результаты предыдущих исследований отдаленного эффекта постинсультной реабилитации с помощью ментальных тренировок положительны: если после 4 нед. тренировок удастся добиться существенного улучшения ДФ, то это улучшение сохраняется и через 6 мес. после лечения [23, 53].

Эффективность повторных курсов ИМК + экзоскелет исследуется, по-видимому, впервые. Она проявлялась в увеличении мышечных сил, управляющих суставами (рис. 3, 4), вовлечения в процесс восстановления разных суставов руки (рис. 3), в увеличении координации между суставами (табл. 2), в улучшении функции захвата (табл. 3, рис. 5). Интервал между курсами реабилитации в нашем исследовании составлял от 2 до 9 мес. и в основном целиком находился в позднем восстановительном периоде. Реабилитационный курс проводился в соответствии с интенсивным

протоколом: 10 ежедневных процедур по 30 мин каждая [12, 18].

Остается открытым вопрос, что предпочтительнее — интенсивные ежедневные тренировки и повторные курсы или редкие тренировки (например, раз в неделю) в течение нескольких месяцев? Имеются данные о том, что повторяемость одного и того же задания неэффективна для двигательного обучения [54]. Кроме того, показано, что разнообразие тренировок, а также перерывы на отдых между ними способствуют эффективности двигательного обучения [55]. Возможно, более эффективны отдельные сессии, проводимые с интервалом, большим, чем один день, но в течение продолжительного времени [22, 56, 57]. Выбор между вариантами протоколов важен и с точки зрения организации лечения: интенсивные тренировки подразумевают госпитализацию пациента, большие интервалы между сессиями — амбулаторное лечение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность повторных курсов ИМК + экзоскелет для постинсультных больных с умеренным и тяжелым парезами в позднем восстановительном периоде проявлялась:

1) в увеличении мышечных сил, управляющих суставными движениями, причем относительное увеличение было больше у пациентов с тяжелым парезом, чем у пациентов с умеренным парезом;

2) в последовательном вовлечении в процесс восстановления разных суставов руки, что свидетельствовало о стимуляции механизмов нейропластичности;

3) в увеличении координации между суставами;

4) в улучшении функции захвата.

Эти результаты получены с помощью сравнительного биомеханического анализа движений паретичных рук пациентов до и после каждого курса ИМК + экзоскелет. Такой анализ позволяет дать численную объективную оценку ДФ и позволяет выявить ее субклинические изменения, не улавливаемые клиническими шкалами.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Московского областного научно-исследовательского клинического института им. М.Ф. Владимирского (протокол № 9 от 2 октября 2014 г.) (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа А.А. Кондур, Л.Г. Турбиной и С.В. Котовой поддержана РФФИ (грант № 19-015-00192), работа Е.В. Бирюковой, А.А. Фролова, П.Д. Боброва выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова (Москва) и поддержана Программой Президиума РАН № 2591-р “Разработка биологически адекватных принципов управления роботизированными системами нейрореабилитации”.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kelly-Hayes M., Beiser A., Kase C. et al. The influence of gender and age on disability following ischemic stroke: the Framingham study. // J. Stroke Cerebrovasc. Dis. 2003. V. 12. № 3. P. 119.
2. Nudo R.J., Milliken G.W., Jenkins W.M., Merzenich M.M. Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys // J. Neurosci. 1996. V. 16. № 2. P. 785.
3. Bach-Y-Rita P. Theoretical and practical considerations in the restoration of function after stroke // Top Stroke Rehabil. 2001. V. 8. № 3. P. 1.
4. Butler A.J., Page S.J. Mental practice with motor imagery: evidence for motor recovery and cortical reorganization after stroke // Arch. Phys. Med. Rehabil. 2006. V. 87. № 12. P. 2.
5. Sharma N., Pomeroy V.M., Baron J.C. Motor imagery: a backdoor to the motor system after stroke? // Stroke. 2006. V. 37. № 7. P. 1941.
6. Pfurtscheller G. EEG event-related desynchronization (ERD) and event related synchronization (ERS) / Electroencephalography: basic principles, clinical applications and related fields // Eds. Niedermeyer E., Lopes da Silva F.H. 4th ed. Baltimore, MD: Williams and Wilkins, 1999. P. 958.
7. Frolov A., Husek D., Bobrov P. Comparison of four classification methods for brain computer interface // Neural Netw. World. 2011. V. 21. № 2. P. 101.
8. Ang K.K., Guan C., Phua K.S. et al. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke // Front. Neuroeng. 2014. V. 7. № 30. P. 30.
9. Ang K.K., Chua K.S., Phua K.S. et al. A randomized controlled trial of EEG-based motor imagery brain-computer interface robotic rehabilitation for stroke. Clin. EEG Neurosci. 2015. V. 46. № 4. P. 310.
10. Ono T., Shindo K., Kawashima K. et al. Brain-computer interface with somatosensory feedback improves functional recovery from severe hemiplegia due to chronic stroke // Front. Neuroeng. 2014. V. 7. P. 19.
11. Ramos-Murguialday A., Broetz D., Rea M. et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study // Ann. Neurol. 2013. V. 74. № 1. P. 100.
12. Frolov A.A., Mokienko O., Lyukmanov R. et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand

- exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial // *Front. Neurosci.* 2017. V. 11. P. 400.
13. Héту S., Grégoire M., Saimpont A. et al. The neural network of motor imagery: an ALE meta-analysis // *Neurosci Biobehav. Rev.* 2013. V. 37. № 5. P. 930.
 14. Фролов А.А., Федотова И.Р., Гусек Д., Бобров П.Д. Ритмическая активность мозга и интерфейс мозг-компьютер, основанный на воображении движений // *Успехи физиологических наук.* 2017. Т. 48. № 3. С. 72.
 15. Cervera M.A., Soekadar S.R., Ushiba J. et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis // *Ann. Clin. Transl. Neurol.* 2018. V. 5. № 5. P. 651.
 16. Monge-Pereira E., Ibañez-Pereda J., Alguacil-Diego I.M. et al. Use of electroencephalography brain-computer interface systems as a rehabilitative approach for upper limb function after a stroke: a systematic review // *PM&R.* 2017. V. 9. № 9. P. 918.
 17. Lee D., Hwang S. Motor imagery on upper extremity function for persons with stroke: a systematic review and meta-analysis // *Phys. Ther. Rehabil. Sci.* 2019. V. 8. № 1. P. 52.
 18. Фролов А.А., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х. и др. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки // *Вестник РГМУ.* 2016. № 2. С. 17.
 19. Котов С.В., Турбина Л.Г., Бобров П.Д. и др. Реабилитация больных, перенесших инсульт, с помощью биоинженерного комплекса "интерфейс мозг-компьютер + экзоскелет" // *Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2014. Т. 114. № 12. С. 66.
 20. Иванова Г.Е., Бушкова Ю.В., Суворов А.Ю. и др. Использование тренажера с многоканальной биологической обратной связью "ИМК-экзоскелет" в комплексной программе реабилитации больных после инсульта // *Журн. высш. нервн. деят.* 2017. Т. 67. № 4. С. 464.
 21. Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А. и др. Интерфейс мозг-компьютер: первый опыт клинического применения в России // *Физиология человека.* 2016. Т. 42. № 1. С. 31. Mokienko O.A., Lyukmanov R.Kh., Chernikova L.A. et al. Brain-computer interface: The first experience of clinical use in Russia // *Human Physiology.* 2016. V. 42. № 1. P. 24.
 22. Бирюкова Е.В., Павлова О.Г., Курганская М.Е. и др. Восстановление двигательной функции руки с помощью экзоскелета кисти, управляемого интерфейсом "мозг-компьютер". Случай пациента с обширным поражением мозговых структур // *Физиология человека.* 2016. Т. 42. № 1. С. 19. Biryukova E.V., Pavlova O.G., Kurganskaya M.E. et al. Recovery of the motor function of the arm with the aid of a hand exoskeleton controlled by a brain-computer interface in a patient with an extensive brain lesion // *Human Physiology.* 2016. V. 42. № 1. P. 13.
 23. Ramos-Murguialday A., Curado M.R., Broetz D. et al. Brain-machine interface in chronic stroke: randomized trial long-term follow-up // *Neurorehab. Neural Repair.* 2019. V. 33. № 3. P. 188.
 24. Frolov A.A., Bobrov P.D., Biryukova E.V. et al. Electrical, hemodynamic and motor activities in post-stroke rehabilitation provided by the hand exoskeleton under control of brain-computer interface: clinical case study // *Front. Neurol.* 2018. V. 9. P. 1135.
 25. Zackowski K.M., Dromerick A.W., Sahrman S.A. et al. How do strength, sensation, spasticity and joint individuation relate to the reaching deficits of people with chronic hemiparesis? // *Brain.* 2004. V. 127. Pt. 5. P. 1035.
 26. Miller L.C., Dewald J.P. Involuntary paretic wrist/finger flexion forces and EMG increase with shoulder abduction load in individuals with chronic stroke // *Clin. Neurophysiol.* 2012. V. 123. № 6. P. 1216.
 27. Ohn S.H., Yoo W.K., Kim D.Y. et al. Measurement of synergy and spasticity during functional movement of the post-stroke hemiplegic upper limb // *J. Electromyogr. Kinesiol.* 2013. V. 23. № 2. P. 501.
 28. Кондур А.А., Бирюкова Е.В., Котов С.В. и др. Кинематический портрет пациента как объективный показатель состояния двигательной функции в процессе нейрореабилитации с использованием экзоскелета руки, управляемого интерфейсом мозг-компьютер // *Ученые записки СПбМГУ им. И.П. Павлова.* 2016. Т. 23. № 3. С. 28.
 29. Colombo R., Sterpi I., Mazzone A. et al. Measuring changes of movement dynamics during robot-aided neurorehabilitation of stroke patients // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2010. V. 18. № 1. P. 75.
 30. Santello M., Lang C.E. Are movement disorders and sensorimotor injuries pathologic synergies? When normal multi-joint movement synergies become pathologic // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. V. 8. P. 1050.
 31. Fugl-Meyer A.R., Jääskü L., Leyman I. et al. The post-stroke hemiplegic patient. 1. A method for evaluation of physical performance // *Scand. J. Rehabil. Med.* 1975. V. 7. № 1. P. 13.
 32. Бобров П.Д., Коршаков А.В., Роцин В.Ю., Фролов А.А. Байесовский подход к реализации интерфейса мозг-компьютер, основанного на представлении движений // *Журн. высш. нервн. деят.* 2012. Т. 62. № 1. С. 89.
 33. Biryukova E.V., Roby-Brami A., Frolov A.A., Mokhtari M. Kinematics of human arm reconstructed from Spatial Tracking System recordings // *J. Biomechanics.* 2000. V. 33. № 8. P. 985.
 34. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, Физматлит, 1972. С. 400.
 35. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека. М.: Медицина, 1967. Т. 1. С. 1326.
 36. Lyle R.C. A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitation treatment and research // *Int. J. Rehab. Res.* 1981. V. 4. № 4. P. 483.
 37. Canolli A., Jones D., Curtis A. et al. Clinical predictive value of manual muscle strength testing during critical illness: an observational cohort study // *Critical Care.* 2013. V. 17. № 5. P. 229.
 38. Мокиенко О.А., Супонева Н.А., Азиатская Г.А. и др. Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности. Клинические рекомендации. М.: МЕДпресс-Информ, 2018. 224 с.
 39. Duncan P.W., Lai S.M., Keighley J. Defining post-stroke recovery: implications for design and interpretation of drug trials // *Neuropharmacology.* 2000. V. 39. № 5. P. 835.
 40. Alt Murphy M.A., Häger C.K. Kinematic analysis of the upper extremity after stroke – how far have we reached

- and what have we grasped? // *Phys. Ther. Rev.* 2015. V. 20. № 3. P. 137.
41. *Dzhalagoniya I., Biryukova E., Bushkova Y. et al.* Biomechanical assessment of Fugl-Meyer score: the case of one post stroke patient who has undergone the rehabilitation using hand exoskeleton controlled by brain-computer interface // *Int. J. Phys. Med. Rehabil.* 2018. V. 6. № 3. P. 468.
 42. *Hesam-Shariati N., Trinh T., Thompson-Butel A.G. et al.* A longitudinal electromyography study of complex movements in poststroke therapy. 2: Changes in coordinated muscle activation // *Front. Neurol.* 2017. V. 8. P. 277.
 43. *Yao J., Chen A., Carmona C., Dewald J.P.A.* Cortical overlap of joint representations contributes to the loss of independent joint control following stroke // *Neuroimage.* 2009. V. 45. № 2. P. 490.
 44. *Cramer S.C., Nelles G., Benson R.R. et al.* A functional MRI study of subjects recovered from hemiparetic stroke // *Stroke.* 1997. V. 28. № 12. P. 2518.
 45. *García-Cossio E., Broetz D., Birbaumer N., Ramos-Murguialday A.* Cortex integrity relevance in muscle synergies in severe chronic stroke // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 744.
 46. *Corti M., McGuirk T.E., Wu S.S., Patten C.* Differential effects of power training versus functional task practice on compensation and restoration of arm function after stroke // *Neurorehabil. Neural Repair.* 2012. V. 26. № 7. P. 842.
 47. *Harris J.E., Eng J.J.* Strength training improves upper-limb function in individuals with stroke: a meta-analysis // *Stroke.* 2010. V. 41. № 1. P. 136.
 48. *Gladstone D.J., Danells C.J., Black S.E.* The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties // *Neurorehabil Neural Repair.* 2012. V. 16. № 3. P. 232.
 49. *Котов С.В., Бирюкова Е.В., Турбина Л.Г. и др.* Динамика восстановления у пациентов с постинсультными двигательными нарушениями при повторных курсах нейрореабилитации с применением экзоскелета кисти, управляемого интерфейсом “мозг-компьютер” // *Журн. высш. нервн. деят.* 2017. Т. 67. № 4. С. 445.
 50. *Levin M.F., Hiengkaew V., Nilanont Y. et al.* Relationship between clinical measures of upper limb movement quality and activity poststroke // *Neurorehabil. Neural Repair.* 2019. V. 33. № 6. P. 432.
 51. *Villàn-Villàn M.A., Pérez-Rodríguez R., Martín C. et al.* Objective motor assessment for personalized rehabilitation of upper extremity in brain injury patients // *Neuro Rehabilitation.* 2018. V. 42. № 4. P. 429.
 52. *Frolov A.A., Husek D., Biryukova E.V. et al.* Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery // *Neural Netw. World.* 2017. V. 27. № 1. P. 107.
 53. *Timmermans A.A., Verbunt J.A., van Woerden R. et al.* Effect of mental practice on the improvement of function and daily activity performance of the upper extremity in patients with subacute stroke: a randomized clinical trial // *J. Am. Med. Dir. Assoc.* 2013. V. 14. № 3. P. 204.
 54. *Krakauer J.W.* Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation // *Curr. Opin. Neurol.* 2006. V. 19. № 1. P. 84.
 55. *Hanlon R.E.* Motor learning following unilateral stroke // *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 1996. V. 77. P. 811.
 56. *Shindo K., Kawashima K., Ushiba J. et al.* Effects of neurofeedback training with an electroencephalogram-based brain-computer interface for hand paralysis in patients with chronic stroke: a preliminary case series study // *J. Rehab. Med.* 2011. V. 43. № 10. P. 951.
 57. *Broetz D., Braun C., Weber C. et al.* Combination of brain-computer interface training and goal-directed physical therapy in chronic stroke: a case report // *Neurorehabil. Neural Rep.* 2010. V. 24. № 7. P. 674.

Rehabilitation of Hand Motor Function in Post-Stroke Patients with Exoskeleton-Controlling Brain-Computer Interface

A. A. Kondur^{a,*}, E. V. Biryukova^{b,c,}, A. A. Frolov^{b,c}, P. D. Bobrov^{b,c}, L. G. Turbina^a,
S. V. Kotov^a, E. V. Zaytseva^a**

^a*Vladimirsky Moscow Regional Research Clinical Institute, Moscow, Russia*

^b*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS, Moscow, Russia*

^c*Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia*

*E-mail: annasams@mail.ru

**E-mail: ebiryukova@mail.ru

Brain-computer interface (BCI) controlled by the exoskeleton is a tool for hand motor function (MF) rehabilitation with proved efficiency and ability to stimulate brain neuroplasticity. In this study we analyzed the effect of repeated rehabilitation courses with BCI + exoskeleton (2 to 9 months after the first course) on the MF restoration in patients within the late recovery period. Biomechanical analysis of patient movements and clinical scales such as the Fugl-Meyer (FM), Action Research Arm Test (ARAT) and Medical Research Council Weakness Scale sum score (MRC-SS) were used to assess MF recovery. We observed a positive effect of repeated rehabilitation courses of BCI + exoskeleton on the restoration of MF both in patients with moderate paresis in the late recovery period and in patients with severe paresis. The data can be useful for developing an appropriate protocol for rehabilitation procedures using the BCI-controlled exoskeleton based on the kinesthetic imagination of movement.

Keywords: brain-computer interface, exoskeleton, motor function, kinesthetic movement imagination, neurorehabilitation, biomechanical analysis of movements, motor function assessment.