



# Эффективность комплексной нейрореабилитации пациентов с постинсультным парезом руки с применением нейроинтерфейса «МОЗГ – КОМПЬЮТЕР» + ЭКЗОСКЕЛЕТ»

Фролов А.А.<sup>1</sup> • Бирюкова Е.В.<sup>1,2</sup> • Бобров П.Д.<sup>1</sup> • Курганская М.Е.<sup>1</sup> • Павлова О.Г.<sup>1</sup> • Кондур А.А.<sup>3</sup> • Турбина Л.Г.<sup>3</sup> • Котов С.В.<sup>3</sup>

**Актуальность.** Восстановление пациентов с двигательными нарушениями после перенесенного инсульта с применением нейроинтерфейса «мозг – компьютер» + экзоскелет (НМКЭ) выводит реабилитацию на новый высокотехнологичный уровень и позволяет эффективно влиять на степень постинсультных изменений.

**Цель** – оценить эффективность процедур НМКЭ для нейрореабилитации больных с постинсультными двигательными нарушениями. **Материал и методы.** В исследование включены 40 больных, перенесших мозговой инсульт (средний возраст  $59 \pm 10,4$  года, 26 мужчин и 14 женщин), из них у 36 человек диагностирован ишемический, у 4 – геморрагический инсульт в сроке от 2 месяцев до 4 лет. У всех пациентов выявлен постинсультный гемипарез различной степени выраженности, преимущественно в руке. Пациентам основной группы ( $n=20$ ) наряду со стандартной терапией проводили 10 занятий по 3 сессии в день с применением НМКЭ.

Интерфейс «мозг – компьютер» осуществлял онлайн-распознавание воображаемого пациентом движения разжимания кисти, и по сигналу обратной связи экзоскелет осуществлял пассивное движение в паретичной руке. Пациентам из контрольной группы ( $n=10$ ) проведены 10 занятий с использованием НМКЭ без подключения воображения движения, экзоскелет срабатывал в произвольном режиме. Группу сравнения составили 10 человек, получавших только стандартную терапию. **Результаты.** К концу срока восстановительной терапии (14-й день) во всех исследуемых группах наблюдалось улучшение показателей функции паретичной конечности. В основной группе отмечено улучшение уровня дееспособности и повседневной активности по сравнению с контролем и группой сравнения: динамика показателей по модифицированной шкале Рэнкина составила  $0,4 \pm 0,1$ ,  $0,1 \pm 0,1$  и  $0,0 \pm 0,2$  ( $p < 0,05$ ), по шкале Бартел –  $5,6 \pm 0,8$ ,  $2,3 \pm 0,3$  и  $1 \pm 0,2$  ( $p < 0,001$ ) соответственно.

В группе с применением НМКЭ двигательная функция паретичной руки, оцененная по шкале ARAT, улучшилась на  $5,5 \pm 1,3$  балла ( $2,4 \pm 0,6$  в контрольной группе и  $1,9 \pm 0,7$  в группе сравнения,  $p < 0,05$ ) и на  $10,8 \pm 1,5$  балла по шкале Fugl-Meyer ( $3,8 \pm 1,05$  в группе сравнения,  $p < 0,001$ ). **Заключение.** Реабилитация пациентов с постинсультными парезами с использованием НМКЭ позволила не только достичь снижения уровня неврологического дефицита и улучшить моторику паретичной руки у пациентов, перенесших инсульт, но и улучшить показатели повседневной активности. В дальнейшем планируется изучить влияние реабилитационных процедур с НМКЭ на кинематику восстановления двигательных функций.

**Ключевые слова:** инсульт, парез руки, реабилитация, нейроинтерфейс, мозг, компьютер, экзоскелет

doi: 10.18786/2072-0505-2016-44-3-280-286

**И**нсульт занимает первое место среди всех причин первичной инвалидности взрослого населения (32 на 100 тыс. населения). Самые частые последствия инсультов – двигательные нарушения – снижают мобильность больных и ухудшают качество их жизни. Реабилитация больных с постинсультными двигательными нарушениями представляет собой одну из наиболее сложных медико-социальных проблем. Сегодня чрезвычайно актуальными становятся исследования по применению новых методик восстановления после инсульта,

в основе которых лежит использование механизма нейропластичности – способности нервной ткани к структурно-функциональной реорганизации [1–3]. При этом показана эффективность нейроинтерфейсов, позволяющих обучать пациентов «новой моторике» на основе индивидуальных пластических возможностей. Имеются данные об успешной реабилитации больных с двигательными нарушениями с применением программно-аппаратных комплексов «интерфейс «мозг – компьютер»» [4–6]. Исследования свидетельствуют о том, что процесс воображения



движения способствует активации сенсомоторных зон коры головного мозга и при целенаправленном систематическом повторении воображения движения активизируется механизм нейропластичности [7, 8]. Контроль за воображением движения можно осуществлять с помощью нейроинтерфейса «мозг – компьютер», который обеспечивает преобразование сигнала головного мозга, возникающего при активном воображении движения и регистрируемого на электроэнцефалограмме, в команду для внешнего устройства – экзоскелета кисти [9, 10].

В последние десятилетия в России и за рубежом возрос интерес к применению нейроинтерфейса «мозг – компьютер + экзоскелет кисти» (НМКЭ), особенно для восстановления моторики руки после инсульта [11–13]. Однако остается открытым вопрос об эффективности использования нейроинтерфейса в комплексной реабилитации больных с постинсультными двигательными нарушениями, влиянии процедур НМКЭ не только на моторику руки, но и на чувствительность, состояние когнитивных функций и другие психологические параметры.

Цель исследования – изучить эффективность процедур НМКЭ для нейрореабилитации больных с постинсультными двигательными нарушениями.

## Материал и методы

Исследование, проходящее в неврологическом отделении ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского в 2014–2016 гг., является фрагментом рандомизированного многоцентрового слепого плацебоконтролируемого исследования iMove, выполняемого на базах ФГБНУ «Научный центр неврологии», ГБУЗ «ГКБ № 31 ДЗМ» и ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского. Протокол исследования iMove зарегистрирован в международном реестре клинических исследований Национального института здоровья США (ClinicalTrials.gov; Identifier: NCT02325947). Исследование одобрено независимым комитетом по этике при ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского (протокол № 9 от 02 октября 2014 г.). В данном сообщении мы рассматриваем только материалы, полученные на базе неврологического отделения ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, предварительные результаты многоцентрового исследования освещены ранее [14].

Под нашим наблюдением было 40 больных, перенесших мозговую инсульт. Из них мужчин было 26, женщин – 14. Средний возраст составил

**Фролов Александр Алексеевич** – д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией математической нейробиологии обучения<sup>1</sup>

**Бирюкова Елена Владимировна** – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения<sup>1,2</sup>

**Бобров Павел Дмитриевич** – науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения<sup>1</sup>

**Курганская Марина Евгеньевна** – канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения<sup>1</sup>

**Павлова Ольга Геннадиевна** – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения<sup>1</sup>

59 ± 10,4 года. У 36 человек диагностирован ишемический, у 4 – геморрагический инсульт в сроке от 2 месяцев до 4 лет. В раннем восстановительном периоде после инсульта было 15 пациентов, в позднем – 13 и в резидуальном – 12.

Предварительным этапом при отборе пациентов для участия в реабилитационной процедуре было выявление наличия соответствия следующим критериям включения:

- пациенты мужского и женского пола, подписавшие информированное согласие на участие в исследовании;
- возраст пациентов от 18 до 80 лет;
- пациенты с подтвержденным первичным нарушением мозгового кровообращения по ишемическому или геморрагическому типу;
- нейровизуализационная верификация наличия очага инсульта;
- давность инсульта от 2 месяцев до 2 лет;
- постинсультные двигательные нарушения в кисти различной степени тяжести (от легкого пареза до плегии).

Следующим этапом отбора пациентов было выявление критериев исключения из исследования, а именно:

- отказ пациента от участия в исследовании;
- оценка когнитивных функций, выявляющая когнитивный дефект уровня деменции;
- наличие леворукости;
- сенсорная афазия, грубая моторная афазия;
- грубое нарушение зрения, не позволяющее выполнять визуальные инструкции на экране компьютера;
- двигательные нарушения в руке иной природы;
- наличие множественных постинсультных очагов, локализация постинсультного очага не в полушарии головного мозга; очаг иной этиологии, кроме постинсультного, по данным магнитно-резонансной или компьютерной томографии.

Состояние больных после инсульта оценивали при помощи клинико-неврологического обследования и дополнительного тестирования с использованием международных шкал, позволяющих определить функцию верхней конечности детально, а также психофизиологических тестов, выявляющих состояние когнитивных функций, активного внимания, психической устойчивости, аффективной сферы пациентов.

При неврологическом обследовании были использованы следующие методы:

- Британская шкала оценки мышечной силы (Medical Research Council Weakness Scale sum score – MRC-SS);

<sup>1</sup> ФГБНУ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН; 117485, г. Москва, ул. Бултерова, 5А, Российская Федерация

<sup>2</sup> ГБОУ ВПО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; 117997, г. Москва, ул. Островитянова, 1, Российская Федерация



- модифицированная шкала Ашворта (Modified Ashworth Scale – MAS) – для определения степени спастичности в мышцах конечностей [15];
- шкала Fugl-Meyer – для оценки двигательной и чувствительной функции дистальных и проксимальных отделов конечности [16];
- тест исследования функции руки (Action Research Arm Test – ARAT), позволяющий оценить способность захвата кисти (шаровой, цилиндрический, шипковый) [17];
- модифицированная шкала Рэнкина (modified Rankin Scale – MRS) и шкала Бартел (Barthel Activities of Daily Living Index – BI) для определения уровня дееспособности и повседневной активности соответственно;
- Монреальская шкала оценки когнитивных функций (Montreal Cognitive Assessment – MoCA);
- таблицы Шульте для исследования устойчивости психических процессов [18].

Всем пациентам было проведено нейровизуализационное исследование головного мозга для уточнения размеров и локализации очага инсульта на магнитно-резонансном томографе Initial Achieva 3.0T (Philips Medical System Nederland B.V., Нидерланды) с напряженностью магнитного поля 3 Тл. Части больных на базе ФГБНУ «Научный центр неврологии» проведена функциональная магнитно-резонансная томография в процессе воображения движения.

Основную группу составили 20 постинсультных больных с гемипарезами различной степени выраженности, преимущественно в руке. Пациентам из этой группы помимо стандартной терапии, проводимой в соответствии со схемой ведения пациентов № 2.25.263.0.6 (утверждена территориальным фондом обязательного медицинского страхования Московской области), дополнительно проведено 10 занятий/тренировок с использованием неинвазивного НМКЭ. Нейроинтерфейсы «мозг – компьютер» – программно-инженерные комплексы, осуществляющие регистрацию и распознавание биоэлектрической активности мозга, связанной с воображением какого-либо действия, и преобразование ее в сигналы биологической обратной связи и/или в команды управления внешними устройствами. Используемая в нашем исследовании система нейроинтерфейса основана на анализе паттернов сигнала, возникающего при воображении движения руки (разгибание пальцев кисти) и регистрируемого на электроэнцефалограмме. Для проведения процедур НМКЭ мы

**Кондр Анна Андреевна** – аспирант кафедры неврологии факультета усовершенствования врачей<sup>3</sup>

**Турбина Лидия Григорьевна** – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры неврологии факультета усовершенствования врачей<sup>3</sup>

**Котов Сергей Викторович** – д-р мед. наук, профессор, руководитель неврологического отделения, заведующий кафедрой неврологии факультета усовершенствования врачей<sup>3</sup>  
✉ 129110, г. Москва, ул. Щепкина, 61/2–10, Российская Федерация. Тел.: +7 (495) 631 73 62. E-mail: kotovsv@yandex.ru

использовали биоинженерный комплекс, состоящий из следующих компонентов:

- энцефалографический аналого-цифровой преобразователь NVX52 производства ООО «Нейроботикс»;
- электроэнцефалографическая шапочка с системой 32 активных электродов ActiCap фирмы Brain Products (Германия) для регистрации электроэнцефалограммы;
- персональный компьютер с программным обеспечением для синхронной передачи данных, распознавания и классификации сигналов электроэнцефалограммы и формирования управляющей команды в реальном времени;
- экзоскелет кисти производства ООО «Нейроботикс», управляемый независимыми пневмомышцами.

В процессе лечения происходило обучение больного правильному (кинестетическому) воображению движения, в результате чего эффективность процедур возрастала (количество случаев правильного воображения/распознавания увеличивалось). Основной группе исследуемых было проведено 10 реабилитационных занятий по одинаковой схеме, включающих 3 сессии в день с перерывом на отдых не менее 5 минут, продолжительность сессии составляла 10 минут. Во время сессии пациент находился в удобном кресле на расстоянии 1 м от экрана монитора, на котором ему каждые 10 секунд представлялись визуальные задания: на расслабление и на воображение движений в правой и левой кисти. При точном исполнении задачи по механизму обратной связи результат задачи отображался на экране – фиксирующая взор метка окрашивалась в зеленый цвет – и экзоскелет выполнял разжатие кисти. При слабом воображении движения метка оставалась белого цвета, и экзоскелет не срабатывал.

*Контрольная группа* в количестве 10 человек получала в дополнение к стандартной терапии процедуры нейроинтерфейса без воображения движения. При этом механизм обратной связи – включение экзоскелета – срабатывал в случайном порядке.

*Группу сравнения* составили 10 пациентов, получавших только стандартную восстановительную терапию по показаниям, включающую лечебную физическую культуру, массаж, физиотерапию.

*Статистическую обработку* результатов проводили на персональном компьютере с применением пакета прикладных программ Statsoft Statistica v.6.0. При сравнении независимых

<sup>3</sup> ГБУЗ МО «Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского»; 129110, г. Москва, ул. Щепкина, 61/2, Российская Федерация

**Таблица 1.** Оценка уровня дееспособности и повседневной активности пациентов, перенесших инсульт

Показатель, баллы	Основная группа (n = 20)			Контрольная группа (n = 10)			Группа сравнения (n = 10)		
	исходно	после терапии	динамика	исходно	после терапии	динамика	исходно	после терапии	динамика
Уровень дееспособности (модифицированная шкала Рэнкина)	2,6 ± 0,1	2,2 ± 0,1**	0,4 ± 0,1*	2,4 ± 0,2	2,3 ± 0,1	0,1 ± 0,1	2,5 ± 0,2	2,5 ± 0,2	0,0 ± 0,2
Повседневная активность (индекс Бартел)	92,8 ± 2,2	98,4 ± 1,3	5,6 ± 0,8**	94,6 ± 1,5	96,9 ± 1,2	2,3 ± 0,3	87 ± 3,7	88 ± 3,5	1 ± 0,2

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего (± m)

Статистически значимые различия с данными контрольной группы и группы сравнения – \* p < 0,05, \*\* p < 0,001

**Таблица 2.** Оценка функции верхней конечности пациентов, перенесших инсульт

Показатель, баллы	Основная группа (n = 20)			Контрольная группа (n = 10)			Группа сравнения (n = 10)		
	исходно	после терапии	динамика	исходно	после терапии	динамика	исходно	после терапии	динамика
Сила мышц (шкала MRC-SS)	2,7 ± 0,2	3,2 ± 0,2	0,5 ± 0,1	2,8 ± 0,5	3,4 ± 0,5	0,2 ± 0,1	2,6 ± 0,3	2,9 ± 0,2	0,3 ± 0,2
Спаستичность мышц (шкала Ашворта)	2,1 ± 0,7	1,9 ± 0,2	0,2 ± 0,2	1,9 ± 0,7	2,3 ± 0,3	-0,4 ± 0,2	1,3 ± 0,2	1,5 ± 0,2	-0,2 ± 0,1
Двигательная функция (шкала ARAT)	21,2 ± 4,4	26,7 ± 4,9	5,5 ± 1,3*	19,6 ± 6,7	22 ± 6,7	2,4 ± 0,6	22,7 ± 8,1	24,6 ± 5,4	1,9 ± 0,7
Двигательная и чувствительная функция (шкала Fugl-Meyer)	81,4 ± 2,3	91 ± 1,4	10,8 ± 1,5**	72 ± 1,6	78,9 ± 1,8	6,3 ± 2,5	83,1 ± 1,6	86,8 ± 1,5	3,8 ± 1,05

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего (± m)

Статистически значимые различия с данными контрольной группы и группы сравнения – \* p < 0,05

Статистически значимые различия с данными группы сравнения – \*\* p < 0,001

выборки использовали критерий Манна – Уитни, зависимых выборок – Уилкоксона, для определения взаимного влияния показателей использовали корреляционный анализ Спирмена. Данные представлены в виде средних значений и ошибки среднего ( $M \pm m$ ). Статистически значимыми считали различия при  $p < 0,05$ .

## Результаты и обсуждение

По данным клинко-нейровизуализационного обследования инсульт был диагностирован у 18 человек в бассейне левой средней мозговой артерии, у 18 – в правой. Речевые нарушения встречались в виде корковой дизартрии – в 3 наблюдениях, элементов моторной афазии – в 12 случаях. Клинически у всех пациентов отмечался постинсультный спастический гемипарез с выраженностью от 1 до 4 баллов.

Предварительная работа по обучению правильному (кинестетическому) воображению движения в паретичной руке позволяла создать положительную мотивацию пациентов к активному участию в реабилитационном процессе. Объективные данные (увеличение частоты

правильного воображения/распознавания) показывают хорошую обучаемость пациентов воображению движения и их вовлеченность в работу. Ранее было установлено, что распознавание воображения движений по реакции десинхронизации  $\mu$ -ритма зарегистрировано у пациентов, перенесших инсульт, в 50–75% случаев, что не отличалось от показателей распознавания у здоровых добровольцев [19, 20]. Процедуры НМКЭ субъективно переносились хорошо. В процессе работы не зарегистрировано случаев ухудшения соматического или психоэмоционального состояния больных. Отмечен общий положительный настрой на лечение и понимание необходимости личного активного участия в восстановительном лечении.

Уровень дееспособности и повседневной активности в начале и в конце курса восстановительной терапии оценивался с помощью модифицированной шкалы Рэнкина и индекса Бартел. Как видно из данных табл. 1, к концу срока восстановительной терапии (к 14-му дню лечения) наблюдалось улучшение способности к самообслуживанию. У пациентов основной группы динамика восстановления к окончанию

**Таблица 3.** Оценка психофизиологических показателей пациентов, перенесших инсульт

Показатель таблицы Шульте	Основная группа (n = 20)			Контрольная группа (n = 10)			Группа сравнения (n = 10)		
	исходно	после терапии	динамика	исходно	после терапии	динамика	исходно	после терапии	динамика
Эффективность работы	71,6 ± 9,5	69,5 ± 9,6	1,6 ± 3,1	55,4 ± 3,7	55 ± 5,4	0,4 ± 4,07	92,5 ± 11,8	94,7 ± 11,5	-2,2 ± 3,8
Степень вработываемости	1,01 ± 0,06	0,9 ± 0,02	0,11 ± 0,04	1,06 ± 0,08	0,98 ± 0,08	0,08 ± 0,01	1,01 ± 0,07	1,04 ± 0,05	-0,03 ± 0,02
Психическая устойчивость	1,06 ± 0,03	1,01 ± 0,03	0,05 ± 0,01	0,98 ± 0,07	1,04 ± 0,08	-0,06 ± 0,01	1,01 ± 0,04	1,0 ± 0,03	0,01 ± 0,01

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего ( $\pm m$ )

лечения была статистически значимо выше, чем у больных контрольной группы и группы сравнения.

К концу курса восстановительной терапии во всех исследуемых группах наблюдалось улучшение показателей функции паретичной конечности (табл. 2). Значимое улучшение отмечено в основной группе: динамика показателей двигательной функции верхней конечности по шкале Fugl-Meyer составила 9,4%; двигательная функция, оцененная по шкале ARAT, увеличилась на 9,6%; сила мышц по MRC-SS возросла на 10%. В контрольной группе и группе сравнения эти показатели увеличились на 6,8 и 3,6%, на 4,2 и 3,3%, на 12 и 6% соответственно. При этом в конце курса лечения показатели моторики паретичной руки при оценке по шкале Fugl-Meyer в основной группе были статистически значимо выше, чем в группе сравнения ( $p < 0,01$ ), а показатели степени захвата кисти, оцененные по шкале ARAT, оказались статистически значимо выше, чем в контрольной группе и группе сравнения ( $p < 0,05$ ).

Всем обследуемым проводилось нейропсихологическое тестирование с использованием таблиц Шульте (табл. 3). В основной группе отмечалась тенденция к некоторому увеличению показателей эффективности работы, степени вработываемости и психической устойчивости.

## Выводы и заключение

Анализ данных, полученных в группах наблюдения, позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение процедур НМКЭ в комплексном восстановительном лечении больных с постинсультными парезами руки позволяет добиться достоверно большего эффекта по сравнению с традиционными методами нейрореабилитации.

2. Тренировки с использованием НМКЭ значимо улучшают моторику паретичной руки после инсульта.

3. Восстановительное лечение постинсультных больных при помощи НМКЭ повышает дееспособность больных и улучшает фон настроения, активизирует внимание и психическую устойчивость, что создает благоприятные условия для активного участия пациентов в процессе нейрореабилитации.

В заключение подчеркнем необходимость продолжения работ в рамках многоцентрового исследования iMove. В дальнейшем мы планируем изучить влияние реабилитационных процедур с НМКЭ на кинематику восстановления двигательных функций, в частности – оценить, насколько восстановление функции руки приближает движения к их физиологической норме. ©

## Литература

1. Faralli A, Bigoni M, Mauro A, Rossi F, Carulli D. Noninvasive strategies to promote functional recovery after stroke. *Neural Plast.* 2013;2013:854597. doi: 10.1155/2013/854597.
2. Yoon JA, Koo BI, Shin MJ, Shin YB, Ko HY, Shin YI. Effect of constraint-induced movement therapy and mirror therapy for patients with subacute stroke. *Ann Rehabil Med.* 2014;38(4):458–66. doi: 10.5535/arm.2014.38.4.458.
3. Котов СВ. Новые технологии в диагностике и лечении больных в остром периоде инсульта. *Русский медицинский журнал.* 2014;22(10):712–6.
4. Lin BS, Pan JS, Chu TY, Lin BS. Development of a Wearable Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface. *J Med Syst.* 2016;40(3):71. doi: 10.1007/s10916-015-0429-6.
5. Hwang HJ, Kwon K, Im CH. Neurofeedback-based motor imagery training for brain-computer interface (BCI). *J Neurosci Methods.* 2009;179(1):150–6. doi: 10.1016/j.jneumeth.2009.01.015.
6. Mrachacz-Kersting N, Jiang N, Stevenson AJ, Niazji IK, Kostic V, Pavlovic A, Radovanovic S, Djuric-Jovicic M, Agosta F, Dremstrup K, Farina D. Efficient neuroplasticity induction in chronic stroke patients by an associative brain-computer interface. *J Neu-*



- rophysiol. 2016;115(3):1410–21. doi: 10.1152/jn.00918.2015.
7. Neuper C, Scherer R, Reiner M, Pfurtscheller G. Imagery of motor actions: differential effects of kinesthetic and visual-motor mode of imagery in single-trial EEG. *Brain Res Cogn Brain Res.* 2005;25(3):668–77. doi: 10.1016/j.cog-brainres.2005.08.014.
  8. Dimyan MA, Cohen LG. Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke. *Nat Rev Neurol.* 2011;7(2):76–85. doi: 10.1038/nrneurol.2010.200.
  9. Prasad G, Herman P, Coyle D, McDonough S, Crosbie J. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study. *J Neuroeng Rehabil.* 2010;7:60. doi: 10.1186/1743-0003-7-60.
  10. Ang KK, Guan C, Chua KS, Ang BT, Kuah C, Wang C, Phua KS, Chin ZY, Zhang H. Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010;2010:5549–52. doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626782.
  11. Pichiorri F, Morone G, Petti M, Toppi J, Pisotta I, Molinari M, Paolucci S, Inghilleri M, Astolfi L, Cincotti F, Mattia D. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery. *Ann Neurol.* 2015;77(5):851–65. doi: 10.1002/ana.24390.
  12. Ang KK, Chua KS, Phua KS, Wang C, Chin ZY, Kuah CW, Low W, Guan C. A Randomized Controlled Trial of EEG-Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke. *Clin EEG Neurosci.* 2015;46(4):310–20. doi: 10.1177/1550059414522229.
  13. Котов СВ, Турбина ЛГ, Бобров ПД, Фролов АА, Павлова ОГ, Курганская МЕ, Бирюкова ЕВ. Реабилитация больных, перенесших инсульт, с помощью биоинженерного комплекса «интерфейс мозг-компьютер + экзоскелет». *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2014;14(12–2):66–72.
  14. Фролов АА, Мокиенко ОА, Люкманов РХ, Черникова ЛА, Котов СВ, Турбина ЛГ, Бобров ПД, Бирюкова ЕВ, Кондур АА, Иванова ГЕ, Старицын АН, Бушкова ЮВ, Джалагония ИЗ, Курганская МЕ, Павлова ОГ, Будилин СЮ, Азиатская ГА, Хижникова АЕ, Червяков АВ, Лукьянов АЛ, Надарейшвили ГГ. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК – экзоскелет при постинсультном парезе руки. *Вестник РГМУ.* 2016;(2):17–25.
  15. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys Ther.* 1987;67(2):206–7.
  16. Fugl-Meyer AR, Jääskö L, Leyman I, Olsson S, Steglind S. The post-stroke hemiplegic patient. 1. A method for evaluation of physical performance. *Scand J Rehabil Med.* 1975;7(1):13–31.
  17. Lyle RC. A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitation treatment and research. *Int J Rehabil Res.* 1981;4(4):483–92.
  18. Белова АН, ред. Шкалы, тесты и опросники в медицинской реабилитации. М.: Антидор; 2002. 440 с.
  19. Котов СВ, Турбина ЛГ, Бобров ПД, Фролов АА, Павлова ОГ, Курганская МЕ, Бирюкова ЕВ. Применение комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет» и техники воображения движения для реабилитации после инсульта. *Альманах клинической медицины.* 2015;39:15–21. doi: 10.18786/2072-0505-2015-39-15-21.
  20. Бирюкова ЕВ, Павлова ОГ, Курганская МЕ, Бобров ПД, Турбина ЛГ, Фролов АА, Давыдов ВИ, Сильченко АВ, Мокиенко ОА. Восстановление двигательной функции руки с помощью экзоскелета кисти, управляемого интерфейсом мозг – компьютер. Случай пациента с обширным поражением мозговых структур. *Физиология человека.* 2016;42(1):19–30. doi: 10.7868/50131164616010033.
- ## References
1. Faralli A, Bigoni M, Mauro A, Rossi F, Carulli D. Noninvasive strategies to promote functional recovery after stroke. *Neural Plast.* 2013;2013:854597. doi: 10.1155/2013/854597.
  2. Yoon JA, Koo BI, Shin MJ, Shin YB, Ko HY, Shin YI. Effect of constraint-induced movement therapy and mirror therapy for patients with subacute stroke. *Ann Rehabil Med.* 2014;38(4):458–66. doi: 10.5535/arm.2014.38.4.458.
  3. Kotov SV. Novye tekhnologii v diagnostike i lechenii bol'nykh v ostrom periode insul'ta [New technologies in diagnostics and treatment of acute stroke patients]. *Russkiy meditsinskiy zhurnal [Russian Medical Journal].* 2014;22(10):712–6 (in Russian).
  4. Lin BS, Pan JS, Chu TY, Lin BS. Development of a Wearable Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface. *J Med Syst.* 2016;40(3):71. doi: 10.1007/s10916-015-0429-6.
  5. Hwang HJ, Kwon K, Im CH. Neurofeedback-based motor imagery training for brain-computer interface (BCI). *J Neurosci Methods.* 2009;179(1):150–6. doi: 10.1016/j.jneumeth.2009.01.015.
  6. Mrachacz-Kersting N, Jiang N, Stevenson AJ, Niazi IK, Kostic V, Pavlovic A, Radovanovic S, Djuric-Jovicic M, Agosta F, Dremstrup K, Farina D. Efficient neuroplasticity induction in chronic stroke patients by an associative brain-computer interface. *J Neurophysiol.* 2016;115(3):1410–21. doi: 10.1152/jn.00918.2015.
  7. Neuper C, Scherer R, Reiner M, Pfurtscheller G. Imagery of motor actions: differential effects of kinesthetic and visual-motor mode of imagery in single-trial EEG. *Brain Res Cogn Brain Res.* 2005;25(3):668–77. doi: 10.1016/j.cog-brainres.2005.08.014.
  8. Dimyan MA, Cohen LG. Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke. *Nat Rev Neurol.* 2011;7(2):76–85. doi: 10.1038/nrneurol.2010.200.
  9. Prasad G, Herman P, Coyle D, McDonough S, Crosbie J. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study. *J Neuroeng Rehabil.* 2010;7:60. doi: 10.1186/1743-0003-7-60.
  10. Ang KK, Guan C, Chua KS, Ang BT, Kuah C, Wang C, Phua KS, Chin ZY, Zhang H. Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010;2010:5549–52. doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626782.
  11. Pichiorri F, Morone G, Petti M, Toppi J, Pisotta I, Molinari M, Paolucci S, Inghilleri M, Astolfi L, Cincotti F, Mattia D. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery. *Ann Neurol.* 2015;77(5):851–65. doi: 10.1002/ana.24390.
  12. Ang KK, Chua KS, Phua KS, Wang C, Chin ZY, Kuah CW, Low W, Guan C. A Randomized Controlled Trial of EEG-Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke. *Clin EEG Neurosci.* 2015;46(4):310–20. doi: 10.1177/1550059414522229.
  13. Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Frolov AA, Pavlova OG, Kurganskaya ME, Biryukova EV. Reabilitatsiya bol'nykh, pereneskhiv insul't, s pomoshch'yu bioinzhenernogo kompleksa «interfeys mozg-komp'yuter+ekzoskelet» [Rehabilitation of post-stroke patients using a bioengineering system “brain-computer interface+exoskeleton”]. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova [S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry].* 2014;14(12–2):66–72 (in Russian).
  14. Frolov AA, Mokienko OA, Lyukmanov RKh, Chernikova LA, Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Biryukova EV, Kondur AA, Ivanova GE, Staritsyn AN, Bushkova YuV, Dzhalongoniya IZ, Kurganskaya ME, Pavlova OG, Budilin SYU, Aziatskaya GA, Khizhnikova AE, Chervyakov AV, Luk'yanov AL, Nadareyshvili GG. Predvari-



tel'nye rezul'taty kontroliruemogo issledovaniya effektivnosti tekhnologii IMK – ekzoskelet pri postinsul'tnom pareze ruki [Preliminary results of a controlled study of BCI-exoskeleton technology efficacy in patients with post-stroke arm paresis]. Vestnik RGMU [Bulletin of RSMU]. 2016;(2):17–25 (in Russian).

15. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys Ther.* 1987;67(2):206–7.
16. Fugl-Meyer AR, Jääskö L, Leyman I, Olsson S, Stegling S. The post-stroke hemiplegic patient. 1. A method for evaluation of physical performance. *Scand J Rehabil Med.* 1975;7(1):13–31.
17. Lyle RC. A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilita-

tion treatment and research. *Int J Rehabil Res.* 1981;4(4):483–92.

18. Belova AN, editor. Shkaly, testy i oprosniki v meditsinskoy reabilitatsii [Scales, tests and questionnaires in medical rehabilitation]. Moscow: Antidor; 2002. 440 p. (in Russian).
19. Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Frolov AA, Pavlova OG, Kurganskaya ME, Biryukova EV. Primenenie kompleksa «interfeys “mozg – komp'yuter” i ekzoskelet» i tekhniki voobrazheniya dvizheniya dlya reabilitatsii posle insul'ta [The use of a complex “brain-computer interface and exo-skeleton” and movement imagination technique for post-stroke rehabilitation]. *Al'manakh klinicheskoy meditsiny.* 2015;39:15–21 (in

Russian). doi: 10.18786/2072-0505-2015-39-15-21.

20. Biryukova EV, Pavlova OG, Kurganskaya ME, Bobrov PD, Turbina LG, Frolov AA, Davydov VI, Sil'chenko AV, Mokienko OA. Vosstanovlenie dvigatel'noy funktsii ruki s pomoshch'yu ekzoskeleta kisti, upravlyaemogo interfeysom mozg – komp'yuter. Cluchay patsienta s obshirnym porazheniem mozgovykh struktur [Restoration of the arm motor function with the use of a hand exoskeleton directed by a brain-computer interface. A case of the patient with an extensive brain injury]. *Fiziologiya cheloveka [Human Physiology].* 2016;42(1):19–30 (in Russian). doi: 10.7868/S0131164616010033.

## Efficacy of complex neurorehabilitation of patients with a post-stroke arm paresis with the use of a brain-computer interface + exoskeleton system

Frolov A.A.<sup>1</sup> • Biryukova E.V.<sup>1,2</sup> • Bobrov P.D.<sup>1</sup> • Kurganskaya M.E.<sup>1</sup> • Pavlova O.G.<sup>1</sup> • Kondur A.A.<sup>3</sup> • Turbina L.G.<sup>3</sup> • Kotov S.V.<sup>3</sup>

**Background:** Rehabilitation of patients with post-stroke motor disorders with the use of a brain-computer interface (BCI)+exoskeleton may raise the rehabilitation to a new high-tech level and allow for an effective correction of the post-stroke dysfunction. **Aim:** To assess the efficacy of BCI+exoskeleton procedures for neurorehabilitation of patients with post-stroke motor dysfunction. **Materials and methods:** The study included 40 patients with a history of cerebral stroke (mean age 59±10.4 years, 26 male and 14 female). Thirty six of them had had an ischemic stroke and 4, a hemorrhagic stroke from 2 months to 4 years before the study entry. All patients had a various degree post-stroke hemiparesis predominantly of the arm. The main group patients (n=20), in addition to conventional therapy, had 10 sessions (3 times daily) of BCI+exoskeleton. The BCI recognized the hand ungrasping imagined by the patient and, by a feedback signal, the exoskeleton exerted the passive movement in the paretic arm. The control group patients (n=10) had 10 BCI+exoskeleton sessions without imaginary movements, and the exoskeleton functioned in a random mode. The comparison group included 10 patients who received only standard treatment. **Results:** At the end of rehabilitation treatment (day 14), all study

groups demonstrated an improvement in the function of the paretic extremity. There was an improvement of functioning and daily activities in the main group, compared to the control and the comparison groups: the change in the modified Rankin scale score was 0.4±0.1, 0.1±0.1 and 0±0.2 (p<0.05), in the Bartel scale score, 5.6±0.8, 2.3±0.3 and 1±0.2 (p<0.001), respectively. In the BCI+exoskeleton group the motor function of the paretic arm assessed by the ARAT scale, improved by 5.5±1.3 points (2.4±0.6 points in the control group and 1.9±0.7 in the comparison group, p<0.05), and as assessed by the Fugl-Meyer scale, by 10.8±1.5 points (3.8±1.05 points in the comparison group, p<0.001). **Conclusion:** Rehabilitation of patients with post-stroke paresis with the use of BCI+exoskeleton led not also to a decrease in neurological deficit and an improvement of the paretic arm motor function, but also improved parameters of daily activities. Further studies of the effects of BCI+exoskeleton rehabilitation procedures on the course of motor function restoration are planned.

**Key words:** stroke, arm paresis, rehabilitation, neurointerface, brain, computer, exoskeleton

doi: 10.18786/2072-0505-2016-44-3-280-286

**Frolov Aleksandr A.** – PhD in Biology, Professor; Head of Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory<sup>1</sup>

**Biryukova Elena V.** – PhD in Biology, Senior Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory<sup>1,2</sup>

**Bobrov Pavel D.** – Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory<sup>1</sup>

**Kurganskaya Marina E.** – PhD, Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory<sup>1</sup>

**Pavlova Ol'ga G.** – PhD in Biology, Senior Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory<sup>1</sup>

**Kondur Anna A.** – Postgraduate Student, Chair of Neurology, Postgraduate Training Faculty<sup>3</sup>

**Turbina Lidiya G.** – MD, PhD, Professor; Chair of Neurology, Postgraduate Training Faculty<sup>3</sup>

**Kotov Sergey V.** – MD, PhD, Professor; Head of Department of Neurology; Head of Chair of Neurology, Postgraduate Training Faculty<sup>1</sup>

✉ 61/2–10 Shchepkina ul., Moscow, 129110, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 631 73 62. E-mail: kotovsv@yandex.ru

<sup>1</sup>Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of Russian Academy of Sciences; 5A Butlerova ul., Moscow, 117485, Russian Federation

<sup>2</sup>Pirogov Russian National Research Medical University; 1 Ostrovityanova ul., Moscow, 117997, Russian Federation

<sup>3</sup>Moscow Regional Research and Clinical Institute (MONIKI); 61/2 Shchepkina ul., Moscow, 129110, Russian Federation