

Интерфейс мозг–компьютер в восстановлении двигательной функции верхней конечности после инсульта



Панков М.Ю.¹, Костенко Е.В.^{1,2}, Петрова Л.В.², Филиппов М.С.²

¹Кафедра неврологии, нейрохирургии и медицинской генетики Института нейронаук и нейротехнологий ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва; ²ГАУЗ Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины им. С.И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы, Москва
¹Россия, 117513, Москва, ул. Островитянова, 1; ²Россия, 127206, Москва, ул. Вучетича, 21

Технология «интерфейс мозг–компьютер» (ИМК) является перспективным направлением для восстановления двигательных функций верхней конечности (ВК). В статье представлены данные рандомизированных клинических исследований за 2016–2024 гг., посвященных применению ИМК при постинсультной дисфункции ВК в зависимости от тяжести пареза, времени начала и периода реабилитации, режима тренировок и оцениваемого показателя. ИМК стимулирует нейропластичность, что подтверждается данными функциональной магнитно-резонансной томографии. Показана эффективность ИМК в восстановлении функции ВК после инсульта по Шкале Фугл-Мейера (Fugl-Meyer Assessment, FMA) и Тесту двигательной активности руки (Action Research Arm Test, ARAT) у пациентов с умеренными и выраженными парезами. Данные о продолжительности двигательного, когнитивного и эмоционального улучшения, влиянии на функциональную независимость представлены в ограниченном числе исследований и требуют дальнейшего изучения.

Ключевые слова: интерфейс мозг–компьютер; нейроинтерфейс; роботизированная механотерапия; реабилитация; инсульт; постинсультная дисфункция верхней конечности; экзокисть; нейропластичность.

Контакты: Максим Юрьевич Панков; dr.pankovmaksim@mail.ru

Для ссылки: Панков МЮ, Костенко ЕВ, Петрова ЛВ, Филиппов МС. Интерфейс мозг–компьютер в восстановлении двигательной функции верхней конечности после инсульта. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2025;17(2):93–99.

DOI: 10.14412/2074-2711-2025-2-93-99

The brain-computer interface in the recovery of upper limb motor function after stroke

Pankov M. Yu.¹, Kostenko E. V.^{1,2}, Petrova L. V.², Filippov M. S.²

¹Department of Neurology, Neurosurgery and Medical Genetics, Institute of Neuroscience and Neurotechnology, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia, Moscow; ²Moscow Research and Practical Centre for Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine named after S.I. Spasokukotskiy, Moscow Health Department, Moscow
¹1, Ostrovityanova St., Moscow 117513, Russia; ²21, Vucheticha St., Moscow 127206, Russia

Brain-computer interface (BCI) technology is a promising development for restoring motor functions of the upper limb (UL). The article presents the data of randomized clinical trials from 2016 to 2024 years on the use of BCIs in post-stroke dysfunction of UL, depending on the severity of paresis, the time of starting and length of rehabilitation period, the training mode and the evaluated indicator. BCI stimulates neuroplasticity, which is confirmed by functional magnetic resonance imaging data. The efficacy of BCI in restoring UL function after stroke is shown according to the Fugl-Meyer Assessment (FMA) and the Action Research Arm Test (ARAT) in patients with moderate and severe paresis. Data on the duration of motor, cognitive and emotional improvement and the impact on functional independence are only available in a limited number of studies and require further investigation.

Keywords: brain-computer interface; neurointerface; robotic mechanotherapy; rehabilitation; stroke; post-stroke upper limb dysfunction; exoskeleton; neuroplasticity.

Contact: Maxim Yuryevich Pankov; dr.pankovmaksim@mail.ru

For reference: Pankov MYu, Kostenko EV, Petrova LV, Filippov MS. The brain-computer interface in the recovery of upper limb motor function after stroke. Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics. 2025;17(2):93–99.

DOI: 10.14412/2074-2711-2025-2-93-99

Ведущим фактором инвалидизации более чем у 80% лиц после церебрального инсульта (ЦИ) являются двигательные расстройства, которые выявляются у 50–90% пациентов [1, 2].

Неудовлетворительное восстановление функции верхней конечности (ВК) ограничивает повседневную активность, влияет на качество жизни и часто связано с недостаточностью медицинской реабилитации (МР). При лег-

ком или умеренном парезе функцию ВК можно улучшить с помощью интенсивных, целенаправленных и повторяющихся занятий [3, 4].

Развитие нейротехнологий «интерфейс мозг-компьютер» (ИМК) и моторных интерфейсов с нейробиоуправлением (НБУ) позволяет эффективно модулировать нейропластические возможности центральной нервной системы (ЦНС). НБУ, в основе которого лежит декодирование электрической или метаболической активности ЦНС в сигналы управления внешним электронным устройством для достижения действия, представляет собой компьютерные информационно-управляющие системы, модифицирующие биопотенциалы головного мозга (ГМ) при участии пациента. ИМК используют для обратной связи (ОС) при тренировках сенсомоторного восстановления функций паретичной ВК [5, 6].

Опубликовано не менее 20 рандомизированных контролируемых исследований (РКИ) и более 10 систематических обзоров применения ИМК при парезах ВК после ЦИ [7–17], имеются доказательная база и технологии ИМК, однако сохраняются ограничения для их широкого применения в постинсультной МР [18–21].

Цель обзора — проанализировать исследования с применением технологий ИМК при постинсультной дисфункции ВК в зависимости от тяжести пареза, времени начала и периода МР, режима тренировок и оцениваемого показателя.

Методология поиска. Поиск проводился по базе PubMed с запросом: (brain-computer OR brain-machine OR neural interface OR “Brain-Computer Interfaces” [Mesh]) AND “Stroke” [Mesh] AND (upper extremity OR hand OR arm) AND “Rehabilitation” [Mesh]. Вручную отбирались РКИ, систематические обзоры и метаанализы с 2016 по 2024 г. Проанализирована библиотека eLIBRARY.ru (ключевые слова: «интерфейс мозг-компьютер», «нейроинтерфейс», «роботизированная механотерапия», «инсульт»).

Технология ИМК

Система НБУ состоит из пяти элементов (шагов) обработки, осуществляемых в режиме реального времени: получение сигнала от ЦНС, его обработка, выделение ключевых признаков, генерирование сигнала ОС и адаптивное

обучение. Последний шаг замыкает контур ОС, где участник учится использовать сигнал ОС для изменения активности ГМ. Выделенные признаки отражают уровень активности области ГМ или сети, а сигнал ОС передает информацию об изменениях ГМ [22, 23]. Технология ИМК активирует нейропластичность сенсорных и моторных структур ЦНС через воображение движения (ВД) [24, 25] и стимулирует зрительный, вестибулярный, проприоцептивный анализаторы [26, 27], позволяя реализовать их комплексную активацию для восстановления ВК [28].

Во время процедуры ИМК пациент получает задание представить ощущение действия в ВК [29–33] или совершить действие [34, 35]. Электроэнцефалография (ЭЭГ) регистрирует активность ГМ [23] с обработкой сигналов [36, 37] и преобразованием их в команды управления внешними устройствами и генерированием биологической обратной связи (БОС) о качестве выполнения мысленного задания [38]. В результате происходит пассивное движение в ВК [30, 35]. Реже задается только зрительная БОС [39].

Кинестетическая и тактильная БОС в виде функциональной электрической стимуляции (ФЭС) позволяет синхронизировать пороговый уровень активность ГМ, фиксируемый ЭЭГ, с сокращением мышц [9, 40].

Тренировки с ИМК могут сочетаться с наблюдением за действием (НД), моторным воображением (МВ) и моторной попыткой (МП). НД включает просмотр предметно-направленных действий с последующим представлением этих действий [41, 42]. МВ — это мысленное представление действия без фактического движения [43, 44]. МП заключается в выполнении действия по команде и предположительно генерирует активность ГМ, помогая обнаружить намерение ИМК [9].

Исследования по ИМК. В таблице приведены основные РКИ [29–31, 33, 34, 45–52], в которых изучалось влияние ИМК на двигательную функцию ВК.

Применение ИМК в МР

Применение ИМК с МВ в сравнении с ее имитацией показало преимущество в восстановлении функции ВК после инсульта. А.А. Фроловым и соавт. [30] установлено, что у пациентов, получавших ИМК с БОС-ЭЭГ и МВ, минимальная клинически значимая разница по ARAT достигнута

Характеристики РКИ

Characteristics of the RCTs

Исследование	ОГ/КГ, число пациентов	Программа реабилитации в ОГ	Программа реабилитации в КГ	Тяжесть пареза руки	Время после инсульта	Период наблюдения	Длительность тренировки	Измеряемые показатели	Вывод
Liu X. и соавт. [45]	30/30	ИМК-ФЭС + МВ + МР	МР	Легкий — тяжелый	До 1 мес	3 нед	20 мин 5 раз в неделю (15 занятий)	FMA, мИБ, WMFT, Schulte Gird test, ANT, SDMT	Когнитивное и двигательное улучшение в ОГ
Brunner I. и соавт. [46]	19/21	ИМК-ФЭС + МВ + МР	МР	Тяжелый	До 2 мес	3–4 нед	60 мин 3–4 раза в неделю (12 занятий)	ARAT, FMA, ЭЭГ	Различий в двигательном улучшении между группами нет, отмечен положительный эффект при сохранении МВП при ТМС

Продолжение таблицы
Continuing of table

Исследование	ОГ/КГ, число пациентов	Программа реабилитации в ОГ	Программа реабилитации в КГ	Тяжесть пареза руки	Время после инсульта	Период наблюдения	Длительность тренировки	Измеряемые показатели	Вывод
Chen L. и соавт. [47]	16/16	ИМК-ФЭС + МВ + МР	НМЭС	Тяжелый – пареза руки	До 5 лет	3 нед	40 мин 4 раза в неделю (11 занятий)	FMA, Kendall MMT, мИБ	Двигательные улучшения более выражены в ОГ, разницы по мИБ не было
Ramos-Murguialday A. и соавт. [48]	16/12	ИМК + МП + МР	Имитация ИМК + МР	Тяжелый	Более 10 мес	4 нед	5 раз в неделю (20 занятий)	FMA, GAS, MAL, MAS, фМРТ	Двигательное улучшение в ОГ сразу после и через 6 мес. По данным фМРТ – положительные изменения в моторных областях в ОГ
Ma Z.Z. и соавт. [33, 49]	20/20	ИМК + МВ + МР	МР	Средне-тяжелый – тяжелый	1–12 мес	2 нед	40 мин 5 раз в неделю (10 занятий)	FMA, фМРТ	Двигательное улучшение в ОГ с активацией пораженных областей по данным фМРТ
Frolov A.A. и соавт. [30]	55/19	ИМК + МВ + МР	Имитация ИМК + МР	Легкий – пареза руки	Более 1 мес	2 нед	40 мин 5 раз в неделю (10 занятий)	FMA, ARAT	Двигательное улучшение в ОГ
Wu Q. и соавт. [31]	14/11	ИМК + МВ + МР	МР	Умеренный – тяжелый	1–6 мес	4 нед	60 мин 5 раз в неделю (20 занятий)	FMA, ARAT, WMFT, фМРТ	Двигательное улучшение в ОГ, улучшения по данным фМРТ в ОГ
Люкманов Р.Х. и соавт. [29]	35/20	ИМК + МВ + МР	Имитация ИМК	Легкий – пареза руки	1 мес – 2 года	2 нед	30 мин (10 занятий)	ARAT, FMA, когнитивные исследования (фигуры Тейлора, пробы Хэда, реакции выбора)	Двигательное и когнитивное улучшение в ОГ
Lee S.H. и соавт. [50]	13/13	ИМК-ФЭС + НД + МР	ФЭС + МР	Легкий – тяжелый	До 12 мес	4 нед	30 мин 5 раз в неделю (20 сеансов)	FMA, WMFT, MAL, мИБ, ЭЭГ	Двигательное улучшение в ОГ, мИБ – улучшение в ОГ
Kim T. и соавт. [51]	15/15	ИМК-ФЭС + НД + МР	МР	Легкий – тяжелый	До 12 мес	4 нед	30 мин 5 раз в неделю (20 сеансов)	FMA, MAL, мИБ, ROM	Двигательное улучшение в ОГ, по мИБ – улучшение в ОГ
Biasiucci A. и соавт. [34]	14/13	ИМК-ФЭС + МП + МР	Имитация ФЭС + МР	Умеренный – тяжелый	От 10 мес	5 нед	60 мин 2 раза в неделю (10 сеансов)	FMA, MRC, MAS, ESS, ЭЭГ	Двигательное улучшение в ОГ, сохранение эффекта через 6–12 мес; по ESS не обнаружено значимых различий между группами
Miao Y. и соавт. [52]	8/8	ИМК-ФЭС + МВ + МР	МР	Легкий – тяжелый	Более 6 мес	4 нед	3 раза в неделю	FMA	Двигательное улучшение в ОГ

Примечание. ОГ – основная группа; КГ – контрольная группа; МВ – моторное воображение; МП – моторная попытка; мИБ – модифицированный индекс Бартел; НМЭС – нервно-мышечная электростимуляция; фМРТ – функциональная магнитно-резонансная томография; ТМС – транскраниальная магнитная стимуляция; МВП – моторные вызванные потенциалы; GAS (Goal Attainment Scale) – Шкала достижения результата; FMA (Fugl-Meyer Assessment of the Upper Extremity) – Шкала Фугл-Мейера для оценки двигательной функции руки; Kendall MMT (Kendall Manual Muscle Testing) – мануальное мышечное тестирование по Кендалл; MRC (Medical Research Council score) – Шкала оценки мышечной силы; MAS (Modified Ashworth Scale) – Модифицированная шкала Эшворта; ESS (European Stroke Scale) – Европейская шкала инсульта; ARAT (Action Research Arm Test) – Тест двигательной активности руки; MAL (Motor Activity Log) – Регистр двигательной активности; ROM (Range of Motion) – диапазон движений лучезапястного сустава; WMFT (Wolf Motor Function Test) – Тест двигательной функции Вольфа; ANT (Attention Network Test) – Тест сетей внимания; Schulte Grid test – Тест Шульте по оценке внимания; SDMT (Symbol Digit Modalities Test) – Тест модальностей символов и цифр.

та в 21,8% случаев, по Шкале Фугл-Мейера (Fugl-Meyer Assessment, FMA) — в 36,4%, тогда как при имитации ИМК доля таковых составила 5,1 и 15,8% соответственно.

В другом РКИ [29] у пациентов, получавших ИМК с МВ, улучшились шаровой ($p=0,012$) и шипковый захват ($p=0,012$), а также крупные движения ВК ($p=0,002$). Установлена корреляция между результатами нейропсихологического тестирования и качеством управления ИМК ($p<0,05$).

Применение ИМК с МВ в сравнении со стандартной МР. Сравнение эффективности комплексного применения лечебной гимнастики и ИМК с МВ (ОГ; $n=11$) и только лечебной гимнастики (КГ; $n=14$) показало лучшее восстановление функции ВК в ОГ по FMA и ARAT по сравнению с КГ. Данные фМРТ показали увеличение функциональных связей в ОГ, что позволило сделать вывод о роли реорганизации функциональных сетей ЦНС между сенсорной, моторной корой и экстрапирамидной системой [31].

Аналогичные результаты получили Z.Z. Ma и соавт. [33, 49]. В ОГ, получавшей ИМК + МВ + МР, было выявлено значимое улучшение по FMA по сравнению с КГ (только МР). На фМРТ была выявлена активация корковых зон, ответственных за движение и обработку зрительно-пространственных отношений.

Применение ИМК с МП и ее имитация. Показано значимое преимущество ИМП + МП сразу и через 6 мес после курса, в отличие от КГ (имитация ИМК), в которой было больше смешанных поражений (коры и подкорковых структур). По данным фМРТ у пациентов с подкорковыми поражениями отмечено смещение двигательной и премоторной активности из противоположного в пораженное полушарие (у 11 пациентов из 14 из ОГ и ни у одного пациента из семи в КГ) сразу после окончания МР на ИМК, что может быть обусловлено функциональной перестройкой коры [48].

Применение ИМК-ФЭС

Применение ИМК-ФЭС + НД и стандартная МР. T. Kim и соавт. [51] отметили различия между ОГ (ИМК-ФЭС + НД + МР; $n=15$) и КГ (только МР; $n=15$) по всем показателям, с большим улучшением по FMA в ОГ: $26,80 \pm 7,22$ балла до тренировки и $34,67 \pm 9,31$ балла после тренировки (в КГ — $21,87 \pm 8,22$ и $24,80 \pm 9,51$ балла соответственно); модифицированный индекс Бартел (МИБ) был выше в ОГ ($p<0,05$), в ОГ было достигнуто клинически значимое улучшение функции ВК в сравнении с КГ ($p<0,05$).

Эффективность комплексации ИМК-ФЭС + НД в сравнении с применением только ФЭС показана S.H. Lee и соавт. [50] в отношении динамики FMA между ОГ и КГ. Различия МИБ между ОГ и КГ были статистически значимы ($p=0,003$).

Применение ИМК-ФЭС с МВ и со стандартной МР. Y. Miao и соавт. [52] выявили, что средний балл по FMA в группе, получавшей ИМК-ФЭС с МВ в дополнение к МР, был выше, чем в группе, получавшей только МР. Это исследование может быть перспективно в связи с применением портивной системы и визуализации виртуальных ВК.

Трехнедельные тренировки на ИМК-ФЭС с МВ в сочетании с МР показали значимые преимущества по сравнению с только МР [45]. Различия по FMA между группами составило 8,0 баллов (95% ДИ 5,0–10,0; $p<0,001$), а прирост

баллов по МИБ — 17 баллов (95% ДИ 12,0–21,0; $p<0,001$) в ОГ по сравнению с КГ. Улучшение внимания и скорости обработки информации по ANT, Тесту Шульте по оценке внимания и SDMT коррелировало с улучшением двигательных функций ($p<0,05$).

I. Brunner и соавт. [46] при изучении эффективности ИМК-ФЭС с МВ дополнительно к МР не выявили различий. Это может быть связано с тем, что у значительного числа пациентов не удалось получить МВП методом ТМС.

Применение ИМК-ФЭС с МВ и НМЭС было изучено L. Chen и соавт. [47], показаны преимущества комплексного применения ИМК-ФЭС с МВ для восстановления ВК по FMA в сравнении с применением НМЭС ($p<0,02$).

Применение ИМК-ФЭС с МП и ФЭС без ИМК исследовалось A. Biasucci и соавт. [34]: в ОГ улучшение по FMA составило $6,6 \pm 5,6$ [0, 18] балла, тогда как в КГ (имитация ФЭС и МР) — только $2,1 \pm 3,0$ [-1, 8] балла. Увеличение силы по MRC после ИМК-ФЭС с МП было значимо выше по сравнению с КГ и через 6–12 мес.

Эффективность ИМК по данным метаанализов показана в отношении восстановления движений ВК в раннем восстановительном периоде [12, 16]. В большинстве РКИ отмечено улучшение функции ВК при среднетяжелых и тяжелых парезах при использовании ИМК, однако имеются и сообщения о худшем восстановлении при тяжелых парезах [46].

Влияние ИМК на постинсультный болевой синдром почти не изучалось и требует уточнения в связи с его распространенностью (10–39%) [53].

Влияние ИМК на когнитивные функции и эмоциональное состояние

Отмечены улучшение когнитивных функций [45] и связь качества управления ИМК с результатами нейропсихологических тестов [29]. В процессе МР с ИМК возможно когнитивное улучшение, но требуются дополнительные исследования [54]. Анализ РКИ не выявил связи ИМК с эмоциональной сферой, однако, по данным L. Liu [55], улучшение движения может сопровождаться положительными изменениями в эмоциональной сфере.

Метаанализ Y.L. Xie и соавт. [16] показал сопоставимость частоты нежелательных явлений и доли выбывших из исследований пациентов между группами с ИМК и без него.

Заключение

В большинстве исследований показана эффективность технологии ИМК в восстановлении движения в ВК после ЦИ. Однако имеется ограниченное количество данных о длительности эффекта, влиянии на когнитивные и эмоциональные функции, а также функциональную независимость пациентов. Нет единого мнения относительно параметров использования ИМК в зависимости от выраженности пареза. В будущем возможности ИМК могут быть расширены за счет программ, направленных на когнитивные и эмоциональные расстройства.

Благодарности. Авторы выражают благодарность проф. М.Ю. Мартынову за научную консультацию при работе над статьей.

1. Dalton EJ, Jamwal R, Augoustakis L, et al. Prevalence of Arm Weakness, Pre-Stroke Outcomes and Other Post-Stroke Impairments Using Routinely Collected Clinical Data on an Acute Stroke Unit. *Neurorehabil Neural Repair*. 2024 Feb;38(2):148-60. doi: 10.1177/15459683241229676. Epub 2024 Feb 10.
2. Simpson LA, Hayward KS, McPeake M, et al. Challenges of Estimating Accurate Prevalence of Arm Weakness Early After Stroke. *Neurorehabil Neural Repair*. 2021 Oct;35(10):871-9. doi: 10.1177/15459683211028240. Epub 2021 Jul 28.
3. Костенко ЕВ, Петрова ЛВ, Мартынов МЮ, Погонченкова ИВ. Эффективность реабилитации с виртуальной реальностью и биологической обратной связью в восстановлении функции кисти после инсульта. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2023;123(3-2):68-75. doi: 10.17116/jnevro202312303268 [Kostenko EV, Petrova LV, Martynov MYu, Pogonchenkova IV. Effectiveness of rehabilitation with virtual reality and biofeedback in recovery of hand function after stroke. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2023;123(3-2):68-75. doi: 10.17116/jnevro202312303268 (In Russ.)].
4. Петрова ЛВ, Костенко ЕВ, Мартынов МЮ и др. Влияние реабилитации с сенсорной перчаткой и виртуальной реальностью на динамику нейротрофического фактора головного мозга и когнитивных вызванных потенциалов P300 в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2023;123(12-2):75-81. doi: 10.17116/jnevro202312312275 [Petrova LV, Kostenko EV, Martynov MYu, et al. The effect of rehabilitation with sensory glove and virtual reality on concentration of brain-derived neurotrophic factor and event related potential P300 in the early rehabilitation period after ischemic stroke. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2023;123(12-2):75-81. doi: 10.17116/jnevro202312312275 (In Russ.)].
5. Khan MA, Das R, Iversen HK, Puthusserypady S. Review on motor imagery based BCI systems for upper limb post-stroke neurorehabilitation: From designing to application. *Comput Biol Med*. 2020 Aug;123:103843. doi: 10.1016/j.compbiomed.2020.103843. Epub 2020 Jun 7.
6. Molinari M, Masciullo M. Stroke and potential benefits of brain-computer interface. *Handb Clin Neurol*. 2020;168:25-32. doi: 10.1016/B978-0-444-63934-9.00003-2
7. Carvalho R, Dias N, Cerqueira JJ. Brain-machine interface of upper limb recovery in stroke patients rehabilitation: A systematic review. *Physiother Res Int*. 2019 Apr;24(2):e1764. doi: 10.1002/pri.1764. Epub 2019 Jan 4.
8. Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review. *J Neuroeng Rehabil*. 2021 Jan 23;18(1):15. doi: 10.1186/s12984-021-00820-8
9. Fu J, Chen S, Jia J. Sensorimotor rhythm-based brain-computer interfaces for motor tasks used in hand upper extremity rehabilitation after stroke: a systematic review. *Brain Sci*. 2022 Dec;13(1):56. doi: 10.3390/brainsci13010056
10. Bai Z, Fong KNK, Zhang JJ, et al. Immediate and long-term effects of BCI-based rehabilitation of the upper extremity after stroke: a systematic review and meta-analysis. *J NeuroEngineering Rehabil*. 2020 Apr;17(1):57. doi: 10.1186/s12984-020-00686-2
11. Kruse A, Suica Z, Taeymans J, Schuster-Amft C. Effect of brain-computer interface training based on non-invasive electroencephalography using motor imagery on functional recovery after stroke — a systematic review and meta-analysis. *BMC Neurol*. 2020 Oct 22;20(1):385. doi: 10.1186/s12883-020-01960-5
12. Yang W, Zhang X, Li Z, et al. The effect of brain-computer interface training on rehabilitation of upper limb dysfunction after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Neurosci*. 2022 Feb;15:766879. doi: 10.3389/fnins.2021.766879
13. Mansour S, Ang KK, Nair KPS, et al. Efficacy of brain-computer interface and the impact of its design characteristics on poststroke upper-limb rehabilitation: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clin EEG Neurosci*. 2022 Jan;53(1):79-90. doi: 10.1177/15500594211009065
14. Peng Y, Wang J, Liu Z, et al. The application of brain-computer interface in upper limb dysfunction after stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Hum Neurosci*. 2022 Mar;16:798883. doi: 10.3389/fnhum.2022.798883
15. Nojima I, Sugata H, Takeuchi H, Mima T. Brain-Computer Interface Training Based on Brain Activity Can Induce Motor Recovery in Patients With Stroke: A Meta-Analysis. *Neurorehabil Neural Repair*. 2022 Feb;36(2):83-96. doi: 10.1177/15459683211062895. Epub 2021 Dec 27.
16. Xie YL, Yang YX, Jiang H, et al. Brain-machine interface-based training for improving upper extremity function after stroke: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Neurosci*. 2022 Aug 3;16:949575. doi: 10.3389/fnins.2022.949575
17. Shou YZ, Wang XH, Yang GF. Verum versus Sham brain-computer interface on upper limb function recovery after stroke: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Medicine (Baltimore)*. 2023 Jun 30;102(26):e34148. doi: 10.1097/MD.00000000000034148
18. Gao W, Cui Z, Yu Y, et al. Application of a Brain-Computer Interface System with Visual and Motor Feedback in Limb and Brain Functional Rehabilitation after Stroke: Case Report. *Brain Sci*. 2022 Aug 16;12(8):1083. doi: 10.3390/brainsci12081083
19. Zhang R, Wang C, He S, et al. An Adaptive Brain-Computer Interface to Enhance Motor Recovery After Stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2023;31:2268-78. doi: 10.1109/TNSRE.2023.3272372. Epub 2023 May 12.
20. Craik A, Gonzalez-España JJ, Alamir A, et al. Design and Validation of a Low-Cost Mobile EEG-Based Brain-Computer Interface. *Sensors (Basel)*. 2023 Jun 26;23(13):5930. doi: 10.3390/s23135930
21. Behboodi A, Lee WA, Hinchberger VS, Damiano DL. Determining optimal mobile neurofeedback methods for motor neurorehabilitation in children and adults with non-progressive neurological disorders: a scoping review. *J Neuroeng Rehabil*. 2022 Sep 28;19(1):104. doi: 10.1186/s12984-022-01081-9
22. Huster RJ, Mokom ZN, Enriquez-Geppert S, Herrmann CS. Brain-computer interfaces for EEG neurofeedback: peculiarities and solutions. *Int J Psychophysiol*. 2014 Jan;91(1):36-45. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2013.08.011. Epub 2013 Sep 4.
23. Mridha MF, Das SC, Kabir MM, et al. Brain-Computer Interface: Advancement and Challenges. *Sensors (Basel)*. 2021 Aug 26;21(17):5746. doi: 10.3390/s21175746
24. Mokienko OA, Chernikova LA, Frolov AA, Bobrov PD. Motor imagery and its practical application. *Neurosci Behav Physiol*. 2014 May;44(5):483-9. doi: 10.1007/s11055-014-9937-y
25. Bhagat NA, Yozbatiran N, Sullivan JL, et al. Neural activity modulations and motor recovery following brain-exoskeleton interface mediated stroke rehabilitation. *Neuroimage Clin*. 2020;28:102502. doi: 10.1016/j.nicl.2020.102502. Epub 2020 Nov 19.
26. Bertani R, Melegari C, De Cola MC, et al. Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis. *Neurol Sci*. 2017 Sep;38(9):1561-9. doi: 10.1007/s10072-017-2995-5. Epub 2017 May 24.
27. Chivukula S, Jafari M, Aflalo T, et al. Cognition in Sensorimotor Control: Interfacing With the Posterior Parietal Cortex. *Front Neurosci*. 2019 Feb 27;13:140. doi: 10.3389/fnins.2019.00140

28. Рубакова АА, Иванова ГЕ, Булатова МА. Активация процессов сенсомоторной интеграции с помощью интерфейса «мозг–компьютер». *Вестник РГМУ*. 2021;(5):29–35. doi: 10.24075/vrgmu.2021.039 [Rubakova AA, Ivanova GE, Bulatova MA. Activation of sensorimotor integration processes with a brain-computer interface. *Vestnik RGMU = Bulletin of RSMU*. 2021;(5):29–35. doi: 10.24075/vrgmu.2021.039 (In Russ.)].
29. Люкманов РХ, Азиатская ГА, Мокиенко ОА и др. Интерфейс мозг–компьютер в постинсультной реабилитации: клинично-нейропсихологическое исследование. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2018;118(8):43–51. doi: 10.17116/jnevro201811808143 [Lyukmanov RKh, Aziatskaya GA, Mokienko OA, et al. Post-stroke rehabilitation training with a brain-computer interface: a clinical and neuropsychological study. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2018;118(8):43–51. doi: 10.17116/jnevro201811808143 (In Russ.)].
30. Frolov AA, 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 Jul 20;11:400. doi: 10.3389/fnins.2017.00400
31. Wu Q, Yue Z, Ge Y, et al. Brain Functional Networks Study of Subacute Stroke Patients With Upper Limb Dysfunction After Comprehensive Rehabilitation Including BCI Training. *Front Neurol*. 2020 Jan 27;10:1419. doi: 10.3389/fneur.2019.01419
32. Li M, Liu Y, Wu Y, et al. Neurophysiological substrates of stroke patients with motor imagery-based Brain-Computer Interface training. *Int J Neurosci*. 2014 Jun;124(6):403–15. doi: 10.3109/00207454.2013.850082. Epub 2013 Oct 31.
33. Ma ZZ, Wu JJ, Hua XY, et al. Evidence of neuroplasticity with brain-computer interface in a randomized trial for post-stroke rehabilitation: a graph-theoretic study of subnetwork analysis. *Front Neurol*. 2023 Jun 6;14:1135466. doi: 10.3389/fneur.2023.1135466
34. Biasucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nat Commun*. 2018 Jun 20;9(1):2421. doi: 10.1038/s41467-018-04673-z
35. Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Ann Neurol*. 2013 Jul;74(1):100–8. doi: 10.1002/ana.23879. Epub 2013 Aug 7.
36. Hramov AE, Maksimenko VA, Pisarchik AN. Physical principles of brain-computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states. *Phys Rep*. 2021;918:1–133. doi: 10.1016/j.physrep.2021.03.002
37. Lotte F, Bougrain L, Cichocki A, et al. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update. *J Neural Eng*. 2018 Jun;15(3):031005. doi: 10.1088/1741-2552/aab2f2. Epub 2018 Feb 28.
38. Королева ЕС, Алифирова ВМ, Латыпова АВ и др. Принципы и опыт применения роботизированных реабилитационных технологий у пациентов после инсульта. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019;18(2):223–33. doi: 10.20538/1682-0363-2019-2-223-233 [Koroleva ES, Alifirova VM, Latypova AV, et al. Principles and global experience of applying robotic rehabilitation technologies in patients after stroke. *Bulleten' sibirskoy mediciny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2019;18(2):223–33. doi: 10.20538/1682-0363-2019-2-223-233 (In Russ.)].
39. Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, et al. Near-infrared spectroscopy-mediated neuro-feedback enhances efficacy of motor imagery-based training in poststroke victims: a pilot study. *Stroke*. 2013 Apr;44(4):1091–8. doi: 10.1161/STROKEAHA.111.674507. Epub 2013 Feb 12.
40. Sinha AM, Nair VA, Prabhakaran V. Brain-Computer Interface Training With Functional Electrical Stimulation: Facilitating Changes in Interhemispheric Functional Connectivity and Motor Outcomes Post-stroke. *Front Neurosci*. 2021 Sep 27;15:670953. doi: 10.3389/fnins.2021.670953
41. Ertelt D, Binkofski F. Action observation as a tool for neurorehabilitation to moderate motor deficits and aphasia following stroke. *Neural Regen Res*. 2012 Sep 15;7(26):2063–74. doi: 10.3969/j.issn.1673-5374.2012.26.008
42. Buccino G. Action observation treatment: a novel tool in neurorehabilitation. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2014 Apr 28;369(1644):20130185. doi: 10.1098/rstb.2013.0185
43. Cunha RG, Da-Silva PJ, Dos Santos Couto Paz CC, et al. Influence of functional task-oriented mental practice on the gait of transtibial amputees: a randomized, clinical trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2017 Apr 11;14(1):28. doi: 10.1186/s12984-017-0238-x
44. Park JS, Choi JB, An DH, Chang MY. Effects of mental practice combined with electromyogram-triggered electrical stimulation for upper extremity function in stroke patients. *J Phys Ther Sci*. 2017 Oct;29(10):1819–20. doi: 10.1589/jpts.29.1819. Epub 2017 Oct 21.
45. Liu X, Zhang W, Li W, et al. Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled trial. *BMC Neurol*. 2023 Mar 31;23(1):136. doi: 10.1186/s12883-023-03150-5
46. Brunner I, Lundquist CB, Pedersen AR, et al. Brain computer interface training with motor imagery and functional electrical stimulation for patients with severe upper limb paresis after stroke: a randomized controlled pilot trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2024 Jan 20;21(1):10. doi: 10.1186/s12984-024-01304-1
47. Chen L, Gu B, Wang Z, et al. EEG-controlled functional electrical stimulation rehabilitation for chronic stroke: system design and clinical application. *Front Med*. 2021 Oct;15(5):740–9. doi: 10.1007/s11684-020-0794-5. Epub 2021 Jun 22.
48. Ramos-Murguialday A, Curado MR, Broetz D, et al. Brain-Machine Interface in Chronic Stroke: Randomized Trial Long-Term Follow-up. *Neurorehabil Neural Repair*. 2019 Mar;33(3):188–98. doi: 10.1177/1545968319827573. Epub 2019 Feb 5.
49. Ma ZZ, Wu JJ, Cao Z, et al. Motor imagery-based brain-computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients. *J Neuroeng Rehabil*. 2024 May 29;21(1):91. doi: 10.1186/s12984-024-01387-w
50. Lee SH, Kim SS, Lee BH. Action observation training and brain-computer interface controlled functional electrical stimulation enhance upper extremity performance and cortical activation in patients with stroke: a randomized controlled trial. *Physiother Theory Pract*. 2022 Sep;38(9):1126–34. doi: 10.1080/09593985.2020.1831114. Epub 2020 Oct 7.
51. Kim T, Kim S, Lee B. Effects of Action Observational Training Plus Brain-Computer Interface-Based Functional Electrical Stimulation on Paretic Arm Motor Recovery in Patient with Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Occup Ther Int*. 2016 Mar;23(1):39–47. doi: 10.1002/oti.1403. Epub 2015 Aug 24.
52. Miao Y, Chen S, Zhang X, et al. BCI-Based Rehabilitation on the Stroke in Sequela Stage. *Neural Plast*. 2020 Dec 13;2020:8882764. doi: 10.1155/2020/8882764
53. Payton H, Soundy A. The Experience of Post-Stroke Pain and The Impact on Quality of Life: An Integrative Review. *Behav Sci (Basel)*. 2020 Aug 7;10(8):128. doi: 10.3390/bs10080128
54. Борисова ВА, Исакова ЕВ, Котов СВ. Возможности интерфейса «мозг–компьютер» в коррекции постинсультных когнитивных нарушений. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2022;122(12-2):60–6. doi: 10.17116/jnevro202212212260 [Borisova VA, Isakova EV, Kotov SV. Possibilities of the brain-computer interface in the correction of post-stroke cognitive impairments. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2022;122(12-2):60–6. doi: 10.17116/jnevro202212212260 (In Russ.)].
55. Liu L, Xu M, Marshall JJ, et al. Prevalence and natural history of depression after stroke: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *PLOS Med*. 2023 Mar;20(3):e1004200. doi: 10.1371/journal.pmed.1004200

Поступила / отрецензирована / принята к печати

Received / Reviewed / Accepted

01.11.2024 / 19.02.2025 / 20.02.2025

Заявление о конфликте интересов / Conflict of Interest Statement

Исследование не имело спонсорской поддержки. Конфликт интересов отсутствует. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

The investigation has not been sponsored. There are no conflicts of interest. The authors are solely responsible for submitting the final version of the manuscript for publication. All the authors have participated in developing the concept of the article and in writing the manuscript. The final version of the manuscript has been approved by all the authors.

Панков М.Ю. <https://orcid.org/0000-0003-1786-0472>

Костенко Е.В. <https://orcid.org/0000-0003-0629-9659>

Петрова Л.В. <https://orcid.org/0000-0003-0353-553X>

Филиппов М.С. <https://orcid.org/0000-0001-9522-5082>