

Нейрокомпьютерные интерфейсы, основанные на регистрации спектроскопии в ближней инфракрасной области и электроэнцефалографии, в постинсультной реабилитации: сравнительное исследование



Мокиенко О.А.^{1,2,3}, Люкманов Р.Х.^{1,3}, Бобров П.Д.^{2,3}, Исаев М.Р.^{2,3},
Иконникова Е.С.¹, Черкасова А.Н.¹, Супонева Н.А.¹, Пирадов М.А.¹

¹ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва; ²ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии» Российской академии наук, Москва; ³ФГАУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва
¹Россия, 125367, Москва, Волоколамское шоссе, 80; ²Россия, 117485, Москва, ул. Бутлерова, 5А; ³Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, 1

Тренировки представления движения под контролем интерфейса мозг–компьютер (ИМК) способствуют двигательному восстановлению после инсульта. Эффективность ИМК на основе электроэнцефалографии (ЭЭГ-ИМК) подтверждена несколькими метаанализами, но более удобный и помехоустойчивый метод спектроскопии в ближней инфракрасной области в контуре ИМК (БИКС-ИМК) практически не изучен, сравнений двух типов ИМК не проводилось.

Цель исследования заключалась в сравнении точности управления и клинической эффективности БИКС-ИМК и ЭЭГ-ИМК в постинсультной реабилитации.

Материал и методы. Группу БИКС-ИМК составили пациенты из неконтролируемого исследования ($n=15$; 9 мужчин и 6 женщин; возраст – 59,0 [49,0; 70,0] года; давность инсульта – 7,0 [2,0; 10,0] мес; парез верхней конечности – 47,0 [35,0; 54,0] балла по шкале Фугл-Мейера для оценки двигательной функции верхней конечности – ФМ-ВК). Группа ЭЭГ-ИМК была сформирована из основной группы рандомизированного контролируемого исследования iMove ($n=17$; 13 мужчин и 4 женщины; возраст – 53,0 [49,0; 70,0] года; давность инсульта – 10,0 [6,0; 13,0] мес; парез верхней конечности – 33,0 [12,0; 53,0] балла по ФМ-ВК). Пациенты проходили курс комплексной реабилитации, дополненный тренировками представления движения под контролем ИМК (в среднем 9 тренировок).

Результаты. Медиана средних показателей качества управления ИМК, достигнутых пациентами, составила 46,4 [44,2; 60,4] % в группе БИКС и 40,0 [35,7; 45,1] % в группе ЭЭГ ($p=0,004$). Для группы БИКС-ИМК медиана максимально достигнутой точности управления ИМК составила 66,2 [56,4; 73,7] %, для ЭЭГ-ИМК – 50,6 [43,0; 62,3] % ($p=0,006$). Доля пациентов, достигших клинически значимого улучшения по шкале ARAT, и доля пациентов, достигших клинически значимого улучшения по ФМ-ВК, были сопоставимы в обеих группах. Для группы БИКС-ИМК наблюдалось большее, по сравнению с группой ЭЭГ-ИМК, улучшение двигательной функции по шкале Action Research Arm Test (ARAT; увеличение на 5,0 [4,0; 8,0] балла по сравнению с увеличением на 1,0 [0,0; 3,0] балла; $p=0,008$), но не по шкале ФМ-ВК (увеличение на 5,0 [1,0; 10,0] и 4,0 [2,0; 5,0] балла соответственно; $p=0,455$).

Заключение. БИКС-ИМК имеет преимущество в точности управления и удобстве применения в клинической практике. Достижение более высокой точности управления ИМК предоставляет дополнительные возможности для применения игровых сценариев обратной связи с целью увеличения мотивации пациентов.

Ключевые слова: постинсультная реабилитация; парез; интерфейсы мозг–компьютер; спектроскопия в ближней инфракрасной области; нейробиоуправление.

Контакты: Олеся Александровна Мокиенко; Lesya.md@yandex.ru

Для ссылки: Мокиенко ОА, Люкманов РХ, Бобров ПД, Исаев МР, Иконникова ЕС, Черкасова АН, Супонева НА, Пирадов МА. Нейрокомпьютерные интерфейсы, основанные на регистрации спектроскопии в ближней инфракрасной области и электроэнцефалографии, в постинсультной реабилитации: сравнительное исследование. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2024;16(5):17–23. DOI: 10.14412/2074-2711-2024-5-17-23

Brain-computer interfaces based on near-infrared spectroscopy and electroencephalography registration in post-stroke rehabilitation: a comparative study

Mokienko O.A.^{1,2,3}, Lyukmanov R.Kh.¹, Bobrov P.D.^{2,3}, Isaev M.R.^{2,3}, Ikonnikova E.S.¹, Cherkasova A.N.¹, Suponeva N.A.¹, Piradov M.A.¹

¹Research Center of Neurology, Moscow; ²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of Russian Academy of Sciences, Moscow; ³N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia, Moscow

¹80, Volokolamskoe Sh., Moscow 125367, Russia; ²5A, Butlerova St., Moscow 117485, Russia; ³1, Ostrovityanova St., Moscow 117997, Russia

Motor imagery training under the control of a brain-computer interface (BCI) facilitates motor recovery after stroke. The efficacy of BCI based on electroencephalography (EEG-BCI) has been confirmed by several meta-analyses, but a more convenient and noise-resistant method of near-infrared spectroscopy in the BCI circuit (NIRS-BCI) has been practically unexamined; comparisons of the two types of BCI have not been performed.

Objective: to compare the control accuracy and clinical efficacy of NIRS-BCI and EEG-IMC in post-stroke rehabilitation.

Material and methods. The NIRS-BCI group consisted of patients from an uncontrolled study ($n=15$; 9 men and 6 women; age – 59.0 [49.0; 70.0] years; stroke duration – 7.0 [2.0; 10.0] months; upper limb paresis – 47.0 [35.0; 54.0] points on the Fugl-Meyer Assessment for motor function evaluation of the upper limb – FM-UL). The EEG-IMC group was formed from the main group of the randomized controlled trial “iMove” ($n=17$; 13 men and 4 women; age – 53.0 [49.0; 70.0] years; stroke duration – 10.0 [6.0; 13.0] months; upper limb paresis – 33.0 [12.0; 53.0] points on the FM-UL). Patients participated in a comprehensive rehabilitation program supplemented by BCI-guided movement imagery training (average of 9 training sessions).

Results. Median of average BCI control rates achieved by the patients was 46.4 [44.2; 60.4]% in the NIRS group and 40.0 [35.7; 45.1]% in the EEG group ($p=0.004$). For the NIRS-BCI group, the median of the maximum BCI control accuracy achieved was 66.2 [56.4; 73.7]%, for EEG-BCI – 50.6 [43.0; 62.3]% ($p=0.006$). The proportion of patients who achieved a clinically significant improvement according ARAT and the proportion of patients who achieved a clinically significant improvement according FM-UL were comparable in both groups. The NIRS-BCI group showed greater improvement in motor function compared to the EEG-BCI group according to Action Research Arm Test (ARAT; an increase of 5.0 [4.0; 8.0] points compared to an increase of 1.0 [0.0; 3.0] points; $p=0.008$), but not according to FM-UL scale (an increase of 5.0 [1.0; 10.0] and 4.0 [2.0; 5.0] points, respectively; $p=0.455$).

Conclusion. NIRS-BCI has an advantage in control accuracy and ease of use in clinical practice. Achieving higher control accuracy of BCI provides additional opportunities for the use of game feedback scenarios to increase patient motivation.

Keywords: post-stroke rehabilitation; paresis; brain-computer interfaces; near-infrared spectroscopy; neurofeedback.

Contact: Olesya Aleksandrovna Mokienko, Lesya.md@yandex.ru

For reference: Mokienko OA, Lyukmanov RKh, Bobrov PD, Isaev MR, Ikonnikova ES, Cherkasova AN, Suponeva NA, Piradov MA. Brain-computer interfaces based on near-infrared spectroscopy and electroencephalography registration in post-stroke rehabilitation: a comparative study. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics.* 2024;16(5):17–23. DOI: 10.14412/2074-2711-2024-5-17-23

Нейрокомпьютерные интерфейсы (интерфейсы мозг–компьютер – ИМК) позволяют осуществлять преобразование данных об электрической или метаболической активности головного мозга в сигналы управления внешним техническим устройством. Неинвазивные ИМК могут применяться в реабилитации пациентов с последствиями инсульта, травмы головного мозга или с детским церебральным параличом для предъявления обратной связи во время представления («воображения») движения. Тренировки представления движения с нейробиоуправлением по обратной связи способствуют стимуляции нейропластичности и двигательному восстановлению или обучению [1, 2].

В последние годы появилась обширная доказательная база для применения ИМК в реабилитации после инсульта. В опубликованных систематических обзорах и метаанализах показано преимущество данных технологий в отношении восстановления движения верхней конечности и увеличения повседневной активности [3–13]. Описано положительное влияние обучения управлению ИМК на когнитивные функции [14, 15]. Кроме того, тренировки с ИМК включают активную парадигму представления движения, являясь единственной активной реабилитационной методикой для пациентов с выраженным парезом.

Существует ряд проблем, препятствующих более широкому применению ИМК в клинической практике. Наиболее изученным и доступным видом ИМК для применения в постинсультной реабилитации являются системы, основанные на регистрации электроэнцефалографических сигналов (ЭЭГ-ИМК) [12]. Однако при использовании данного типа ИМК требуется дополнительное время для установки датчиков и внесения под них электродного геля, в то время как системы ЭЭГ с сухими электродами редко

позволяют регистрировать сигнал нужного качества. ИМК на основе регистрации спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИКС-ИМК) – разновидность неинвазивных портативных нейрокомпьютерных интерфейсов, также позволяющих проводить тренировки представления движения с предъявлением обратной связи. БИКС – метод оптической регистрации изменения гемодинамики на глубине до 4 см от поверхности головы. Свет ближнего инфракрасного диапазона (760–850 нм) излучается источниками, расположенными на поверхности головы, детекторы регистрируют изменения интенсивности поглощения и рассеивания света, которые определяются изменением уровня церебрального гемоглобина [16]. Показателями активности мозга в данном случае могут являться сразу несколько оптически измеряемых параметров: изменение концентрации окси-, дезокси- или общего гемоглобина (HbO, HbR или HbT). Для использования данной технологии не требуется электродный гель, а электромагнитные помехи и движения пациента во время тренировок не приводят к серьезным искажениям сигнала [17]. Вероятно, указанные преимущества БИКС-ИМК могут способствовать достижению более высоких показателей качества управления нейроинтерфейсом и восстановления двигательной функции. В настоящий момент БИКС-ИМК является намного более дорогой технологией, чем ЭЭГ-ИМК, и остается практически неизученным для применения с клиническими целями [16, 18–20]. Прямых сравнений клинического применения БИКС- и ЭЭГ-ИМК к настоящему времени не описано.

Цель исследования заключалась в сравнении точности управления и клинической эффективности БИКС- и ЭЭГ-ИМК в постинсультной двигательной реабилитации.

Материал и методы. Мы провели нерандомизированное клиническое исследование с историческим контролем для сравнения результатов применения БИКС-ИМК и ЭЭГ-ИМК в комплексной постинсультной реабилитации. Группу БИКС-ИМК (n=15) составили пациенты из неконтролируемого исследования, проведенного на базе ФГБНУ «Научный центр неврологии» [19, 21]. Группа ЭЭГ-ИМК (n=17) была сформирована из основной группы рандомизированного контролируемого исследования iMove [22]. В оба исследования включали пациентов с первичным или вторичным инсультом, наличием пареза верхней конечности, в клинически стабильном состоянии. В исследования не включали пациентов с тяжелыми нарушениями зрения, речи и других когнитивных функций, с контрактурой тканей кисти. Поскольку критерии включения в исследование iMove были шире, чем в исследовании БИКС-ИМК, из общей выборки пациентов основной группы iMove в текущее исследование были включены пациенты с корковой или корково-подкорковой локализацией и сопоставимыми показателями выраженности пареза руки и давности заболевания.

Протоколы ранее проведенных исследований прежде были одобрены локальным этическим комитетом ФГБНУ «Научный центр неврологии» (заключение № 5-4/22 от 01.06.2022 для БИКС-ИМК и № 12/14 от 10.12.2014 для iMove). Все пациенты предоставили письменное информированное согласие на участие в соответствующем исследовании.

Основные клинические и демографические характеристики пациентов, включенных в текущее исследование, были сопоставимы в двух группах. Число дней тренировок ИМК и общее время этих тренировок также были сопоставимы (табл. 1).

Пациенты проходили курс комплексной постинсультной реабилитации госпитального этапа, дополненной тренировками представления движения под контролем ИМК: ежедневно, кроме выходных, всего от 4 до 15 (в среднем – 9) тренировок. В процессе каждой тренировки пациент сидел за столом перед компьютерным монитором. В центре темного экрана монитора находился круг, служащий для фиксации взора, вокруг него располагались три стрелки. Пациент выполнял одну из трех инструкций: кинестетически представить медленное движение левой или правой кисти (при изменении цвета стрелки слева или справа соответственно) или расслабиться и смотреть в центр экрана

(при изменении цвета верхней стрелки). В случае успешного распознавания классификатором соответствующей задачи цвет фиксирующей взор метки в середине экрана становился зеленым. В исследовании ЭЭГ-ИМК (iMove), помимо визуальной, также предоставлялась кинестетическая обратная связь с помощью экзоскелета, раскрывающего кисть (рис. 1).

Для спектроскопии в ближней инфракрасной области применялся аппарат NIRScout (NIRx Medical Technologies, США), содержащий 16 источников излучения и 8 детекторов. В исследовании iMove сигналы ЭЭГ регистрировались с помощью 30 электродов, размещенных в соответствии

Таблица 1. *Общая характеристика пациентов каждой из групп исследования*

Table 1. *General characteristics of patients in each study group*

Характеристика	БИКС-ИМК (n=15)	ЭЭГ-ИМК (n=17)	P
Возраст, годы, Ме [25-й; 75-й перцентили]	59,0 [49,0; 70,0]	53,0 [49,0; 70,0]	0,100
Пол, мужчины/женщины	9/6	13/4	0,450
Давность инсульта, мес, Ме [25-й; 75-й перцентили]	7,0 [2,0; 10,0]	10,0 [6,0; 13,0]	0,122
Пораженное полушарие, левое/правое	8/7	11/6	0,720
Балл по шкале ARAT, Ме [25-й; 75-й перцентили]	35,0 [10,0; 44,0]	21,0 [0,0; 43,0]	0,396
Балл по шкале ФМ-ВК, Ме [25-й; 75-й перцентили]	47,0 [35,0; 54,0]	33,0 [12,0; 53,0]	0,093
Число тренировочных дней, Ме [25-й; 75-й перцентили]	10,0 [9,0; 12,0]	9,0 [8,0; 10,0]	0,067
Общая экспозиция ИМК, мин, Ме [25-й; 75-й перцентили]	218,0 [91,0; 314,0]	210,0 [190,0; 256,0]	0,737

Примечание. ARAT – тест исследования действия руки (Action Research Arm Test); ФМ-ВК – раздел шкалы Фугл-Мейера для оценки двигательной функции верхней конечности.

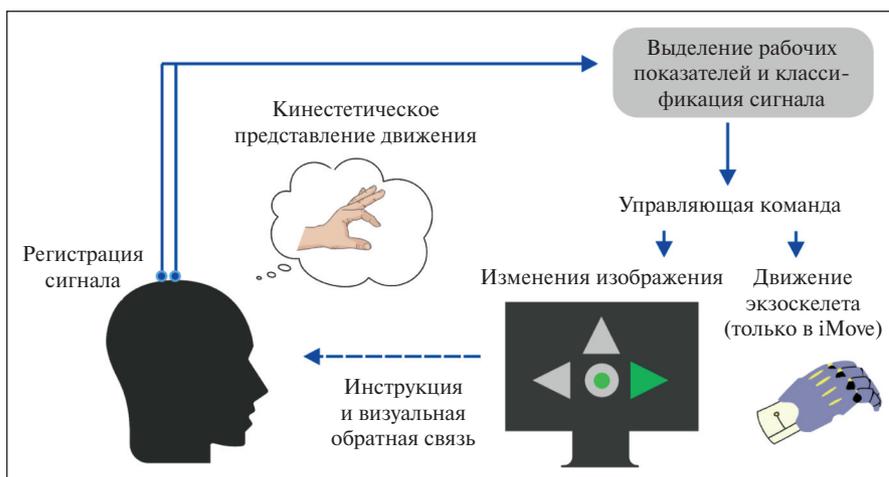


Рис. 1. *Общая схема системы ИМК и процесса тренировки'*
Fig. 1. *General scheme of the BCI system and the training process*

¹Цветные рисунки к этой статье представлены на сайте журнала: nnp.ima-press.net

с Международной системой 10-20 (NVX52, «Медицинские компьютерные системы», Зеленоград, Россия). Для обработки сигнала в реальном времени в ЭЭГ-ИМК применялась частотная фильтрация в диапазоне от 5 до 30 Гц, а для распознавания представления движений — байесовский классификатор на основе ковариационных матриц, рассчитанных для трех ментальных задач. В БИКС-ИМК применялся способ фильтрации, учитывающий частоту предъявления инструкций с целью минимизации временной задержки, а классификация была последовательной: при помощи линейного дискриминантного анализа сначала состояние покоя отделялось от представления движений, а затем, если движение распознано, определялось, движение какой руки представляется [23]. Подробный протокол исследования БИКС-ИМК описан в работах [19, 21], исследования ЭЭГ-ИМК (iMove) — в работе [22]. Основные различия методики проведения ИМК-тренингов в двух исследованиях представлены в табл. 2.

Для оценки двигательной функции руки до и после курса реабилитации применяли тест ARAT (максимальное возможное значение — 57 баллов, минимальное клинически значимое увеличение — на 6 единиц в хроническом периоде и на 12–17 единиц в подостром периоде инсульта) [24], а также раздел шкалы Фугл-Мейера для двигательной функции верхней конечности (ФМ-ВК, максимальное возможное значение — 66 баллов, клинически значимое увеличение — на 5 единиц в хроническом периоде и на 9 единиц в подостром периоде инсульта) [24–27].

Анализируемый в данном исследовании показатель точности классификации или качества управления ИМК

представляет собой среднюю вероятность правильного распознавания, т. е. среднюю долю случаев правильного распознавания выполняемой задачи среди всех предъявлений соответствующей инструкции. При его значении более 33% распознаваний сигнала считается выше случайного, так как пациент выполняет по инструкции три ментальные задачи ($100\% : 3 = 33\%$). Качество управления ИМК зависит как от производительности классификатора, так и от способности участника мысленно представлять движение.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью критериев Манна–Уитни, Вилкоксона и точного теста Фишера на персональном компьютере с применением пакета прикладных программ Statistica v. 6.0 (Statsoft Inc., США). Данные представлены в виде медианы (Me) и верхнего и нижнего квартилей [25-го; 75-го перцентилей]. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты. Медиана средних показателей качества управления ИМК, достигнутых пациентами, составила 46,4 [44,2; 60,4] % в группе БИКС и 40,0 [35,7; 45,1] % в группе ЭЭГ ($p = 0,004$). Также между группами выявлено различие в максимальных показателях качества управления: для группы БИКС данный показатель составил 66,2 [56,4; 73,7] %, для группы ЭЭГ — 50,6 [43,0; 62,3] % ($p = 0,006$; рис. 2).

Двигательное восстановление по шкале ФМ-ВК, доля пациентов, достигших клинически значимого улучшения по ARAT, и доля пациентов, достигших клинически значимого улучшения по ФМ-ВК, были сопоставимы в обеих группах. Для группы БИКС-ИМК наблюдалось большее, по сравнению с группой ЭЭГ-ИМК, улучшение двигательной функции по шкале ARAT (увеличение на 5,0 [4,0; 8,0] балла по сравнению с увеличением на 1,0 [0,0; 3,0] балла; $p = 0,008$; табл. 3).

Обсуждение. В данном сравнительном исследовании показано, что пациенты после инсульта достигают значимо более высоких показателей точности управления БИКС-ИМК, чем ЭЭГ-ИМК. Это может быть объяснено двумя факторами. Во-первых, источниками активности мозга в БИКС-ИМК могут являться сразу несколько параметров: изменение концентрации HbO, HbR или HbT, — что облегчает задачу классификатора. Во-вторых, по сравнению с ЭЭГ, БИКС обладает большей помехоустойчивостью при регистрации сигналов мозга [16, 17]. Следует отметить, что разная природа сигналов ЭЭГ и БИКС неизбежно требует несколько различающихся подходов к их предобработке и классификации, однако описываемые подходы являются достаточно простыми с математической точки зрения. Поэтому различия в используемых подходах к классификации вряд ли являются основной причиной полученных различий в точности управления ИМК.

Улучшение двигательных функций на фоне курса тренировок пред-

Таблица 2. Основные различия протоколов тренировок представления движения в исследованиях БИКС-ИМК и ЭЭГ-ИМК

Table 2. Main differences in the training protocols for motor imagery in the NIRS-BCI and EEG-BCI studies

Показатель	БИКС-ИМК	ЭЭГ-ИМК (iMove)
Подготовка к процедуре	Надевание шапочки с электродами	Надевание шапочки и внесение геля под каждый электрод
Регистрируемый сигнал	Изменение гемодинамического ответа (относительных концентраций HbO, HbR, HbT) в коре головного мозга, регистрируемое методом БИКС	Пространственное и частотное изменение ЭЭГ-ритмов в диапазоне 5–30 Гц
Представляемое движение	Движение из теста ARAT, выполнение которого наиболее затруднительно для конкретного пациента; «прайминг» перед каждым тренингом — попытка выполнения целевого движения	Медленное раскрытие кисти (разгибание пальцев)
Калибровка ИМК	Обратная связь включалась сразу после первой сессии; в последующих сессиях для распознавания мысленных задач в первом блоке использовался классификатор, обученный на всех ранее записанных сессиях этого пациента	Первые несколько попыток представления движений проходили без обратной связи, во время каждой сессии классификатор ИМК обучался заново
Обратная связь	Визуальная	Визуальная и кинестетическая (с помощью экзоскелета)

ставления движения при использовании технологий БИКС-ИМК или ЭЭГ-ИМК было сопоставимо, но при оценке движений руки с помощью шкалы ARAT больший эффект наблюдался при применении БИКС-ИМК. Поскольку исследование БИКС-ИМК проводилось через несколько лет после исследования iMove, на различие в улучшении по ARAT могли повлиять другие факторы, например изменение общего протокола комплексной реабилитации или увеличение срока госпитализации. Поэтому данный результат следует интерпретировать с осторожностью. Кроме того, в исследовании iMove дополнительно применялся экзоскелет руки, а в исследовании БИКС-ИМК – прайминг (попытка выполнения целевого движения перед представлением движения). Для более точного сравнительного анализа двух типов интерфейсов в отношении клинического

эффекта потребуются рандомизированное клиническое исследование в параллельных группах и одинаковый тип обратной связи (только визуальная, либо в каждой группе визуальная и кинестетическая). В то же время факторы, связанные с разным временем проведения исследований, вряд ли могли повлиять на качество управления ИМК, так как парадигма и сценарий управления интерфейсом были одинаковыми, а общее время проведения упражнений – сопоставимым.

На настоящий момент описано несколько исследований, в которых метод БИКС применялся в двигательной реабилитации после инсульта. В двух работах с помощью БИКС измеряли латерализацию активности первичной моторной коры после инсульта и корреляцию данного показателя со степенью двигательного нарушения [18, 20, 28]. Примечательно, что в одном исследовании продемонстрирована возможность применения БИКС в домашних условиях [20].

В рандомизированном исследовании с участием 20 пациентов М. Mihara и соавт. [18] продемонстрировали эффективность БИКС-ИМК для проведения тренировок представления движения у пациентов с подкорковым инсультом. На фоне курса из шести тренировок наблюдалось более выраженное улучшение двигательной функции кисти по шкале Фулл-Мейера в основной группе по сравнению с группой имитации БИКС-ИМК. В отличие от системы, используемой в нашей работе, технология БИКС-ИМК, применявшаяся в исследовании М. Mihara и соавт., не подразумевала классификации сигнала в режиме реального времени: пациенту просто следовало управлять уровнем сигнала в парадигме биологической обратной связи.

Основным *ограничением* нашего исследования является ретроспективный, нерандомизированный, характер сравнения. Полученные результаты позволяют предположить клиническое преимущество одного типа ИМК над другим, однако их следует интерпретировать с осторожностью. В дальнейшем необходимо проведение рандомизированного контролируемого исследования с адекватной мощностью, которое может подтвердить предположение о преимуществе БИКС-ИМК.

Насколько нам известно, проведенное нами исследование является первым сравнением точности управления и клинической эффективности БИКС- и ЭЭГ-ИМК в постинсультной двигательной реабилитации.

Заключение. Таким образом, при по меньшей мере сопоставимой клинической эффективности двух типов интерфейсов, БИКС-ИМК имеет преимущество в точности управления и удобстве применения в реальной клинической практике. Большая помехоустойчивость БИКС и достижение более высокой точности работы ИМК позволяют увеличить долю правильно подкрепленных попыток представить движение, а также предоставляют дополнительные возможности для применения игровых сценариев обратной связи с целью повышения мотивации пациентов.

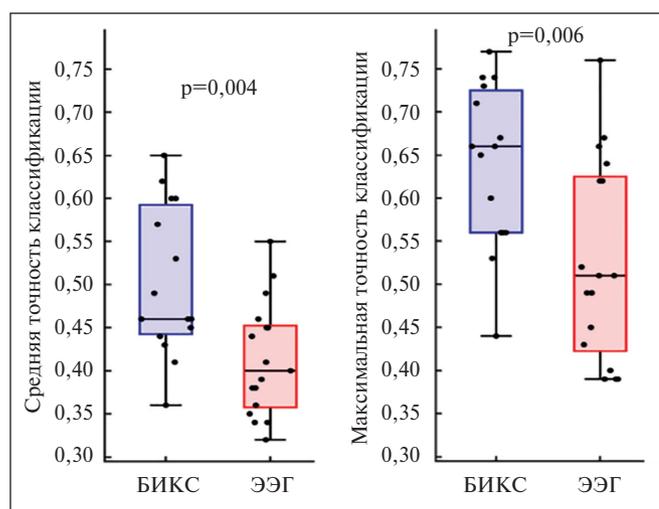


Рис. 2. Показатели качества управления БИКС-ИМК или ЭЭГ-ИМК пациентами после инсульта, в долях от единицы. Ящики: медиана, 25-й; 75-й перцентили; усы – минимальные и максимальные значения выборки
Fig. 2. Indicators of the quality of NIRS-BCI or EEG-BCI control in post-stroke patients, as fractions of one. Boxes: median, 25th; 75th percentiles; whiskers – minimum and maximum values of the sample

Таблица 3. *Динамика двигательного восстановления на фоне курса реабилитации*

Table 3. *Dynamics of motor recovery during the rehabilitation process*

Показатель	БИКС-ИМК (n=15)	ЭЭГ-ИМК (n=17)	p
Улучшение по ARAT, Me [25-й; 75-й перцентили]	5,0 [4,0; 8,0]	1,0 [0,0; 3,0]	0,008
Улучшение по ФМ-ВК, Me [25-й; 75-й перцентили]	5,0 [1,0; 10,0]	4,0 [2,0; 5,0]	0,455
Достигли клинически значимого улучшения по ARAT, n (%)	4 (26,7)	2 (11,8)	0,383
Достигли клинически значимого улучшения по ФМ-ВК, n (%)	5 (33,3)	5 (29,4)	1,000

1. Мокиенко ОА, Люкманов РХ, Бобров ПД и др. Интерфейсы мозг—компьютер для восстановления движений руки после инсульта: текущий статус и перспективы разработок (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2023;15(6):63-74. doi: 10.17691/stm2023.15.6.07 [Mokienko OA, Lyukmanov RH, Bobrov PD, et al. Brain-computer interfaces for upper limb motor recovery after stroke: current status and development prospects (review). *Sovremennyye tekhnologii v meditsine*. 2023;15(6):63-74. doi: 10.17691/stm2023.15.6.07 (In Russ.)].
2. Федотова ИР, Бобров ПД. Предпосылки и особенности использования воображения движения и интерфейса мозг—компьютер в реабилитации при детском церебральном параличе. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2022;72(1):87-99. doi: 10.31857/S004446772201004X [Fedotova IR, Bobrov PD. Foundation and aspects of using motor imagery and brain computer interfaces in rehabilitation of children with cerebral palsy. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti imeni I.P. Pavlova*. 2022;72(1):87-99. doi: 10.31857/S004446772201004X (In Russ.)].
3. 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.
4. 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
5. 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 28;13(1):56. doi: 10.3390/brainsci13010056
6. 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 Neuroeng Rehabil*. 2020 Apr 25;17(1):57. doi: 10.1186/s12984-020-00686-2
7. 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
8. 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 7;15:766879. doi: 10.3389/fnins.2021.766879
9. 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. Epub 2021 Apr 29.
10. 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 29;16:798883. doi: 10.3389/fnhum.2022.798883
11. 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.
12. 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
13. 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
14. Борисова ВА, Исакова ЕВ, Котов СВ. Возможности интерфейса «мозг—компьютер» в коррекции постинсультных когнитивных нарушений. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски*. 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.)].
15. Котов СВ, Слюнькова ЕВ, Борисова ВА, Исакова ЕВ. Эффективность применения интерфейсов «мозг—компьютер» и когнитивных тренировок с использованием компьютерных технологий в восстановлении когнитивных функций у пациентов после инсульта. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски*. 2022;122(12-2):67-75. doi: 10.17116/jnevro202212212267 [Kotov SV, Slyunkova EV, Borisova VA, Isakova EV. Effectiveness of brain-computer interfaces and cognitive training using computer technologies in restoring cognitive functions in patients after stroke. *Zhurnal neurologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2022;122(12-2):67-75. doi: 10.17116/jnevro202212212267 (In Russ.)].
16. Soekadar SR, Kohl SH, Mihara M, von Lühmann A. Optical brain imaging and its application to neurofeedback. *Neuroimage Clin*. 2021;30:102577. doi: 10.1016/j.nicl.2021.102577. Epub 2021 Jan 26.
17. Huo C, Xu G, Xie H, et al. Functional near-infrared spectroscopy in non-invasive neuromodulation. *Neural Regen Res*. 2024 Jul 1;19(7):1517-22. doi: 10.4103/1673-5374.387970. Epub 2023 Nov 8.
18. Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, et al. Near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback 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.
19. Люкманов РХ, Исаев МР, Мокиенко ОА и др. Интерфейс мозг—компьютер, основанный на спектроскопии в ближней инфракрасной области, в двигательной реабилитации после инсульта: описание серии случаев. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2023;17(4):82-8. doi: 10.54101/ACEN.2023.4.10 [Lyukmanov RKH, Isaev MR, Mokienko OA, et al. Brain-computer interface using functional near-infrared spectroscopy for post-stroke motor rehabilitation: Case Series. *Annaly klinicheskoi i eksperimental'noi neurologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology*. 2023;17(4):82-8. doi: 10.54101/ACEN.2023.4.10 (In Russ.)].
20. Lee Friesen C, Lawrence M, Ingram TGJ, Boe SG. Home-based portable fNIRS-derived cortical laterality correlates with impairment and function in chronic stroke. *Front Hum Neurosci*. 2022 Dec 9;16:1023246. doi: 10.3389/fnhum.2022.1023246
21. Isaev MR, Mokienko OA, Lyukmanov RK, et al. A Multiple Session Dataset of NIRS Recordings From Stroke Patients Controlling Brain-Computer Interface. *medRxiv*. 2024. doi: 10.1101/2024.03.27.24304842
22. 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
23. Isaev MR, Bobrov PD. Effects of Selection of the Learning Set Formation Strategy and Filtration Method on the Effectiveness of a BCI Based on Near Infrared Spectrometry. *Neurosci Behav Physiol*. 2023;53(3):373-80. doi: 10.1007/s11055-023-01436-2

24. Мокиенко ОА, Супонева НА. Диагностика с использованием двигательных шкал. В кн.: Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности. Клинические рекомендации. Москва: МЕДпресс-Информ; 2018. С. 64. [Mokienko OA, Suponeva NA. Diagnostics using motor scales. In the book: Stroke in adults: central paresis of the upper limb. Clinical guidelines. Moscow: MEDpress-Inform; 2018. P. 64 (In Russ.)].
25. Mattke S, Cramer SC, Wang M, et al. Estimating minimal clinically important differences for two scales in patients with chronic traumatic brain injury. *Curr Med Res Opin.* 2020 Dec;36(12):1999-2007. doi: 10.1080/03007995.2020.1841616. Epub 2020 Nov 9.
26. Arya KN, Verma R, Garg RK. Estimating the minimal clinically important difference of an upper extremity recovery measure in subacute stroke patients. *Top Stroke Rehabil.* 2011 Oct;18 Suppl 1:599-610. doi: 10.1310/tsr18s01-599
27. Page SJ, Fulk GD, Boyne P. Clinically important differences for the upper-extremity Fugl-Meyer Scale in people with minimal to moderate impairment due to chronic stroke. *Phys Ther.* 2012 Jun;92(6):791-8. doi: 10.2522/ptj.20110009. Epub 2012 Jan 26.
28. Takeda K, Gomi Y, Kato H. Near-infrared spectroscopy and motor lateralization after stroke: a case series study. *Int J Phys Med Rehabil.* 2014;2(3):192-7. doi: 10.4172/2329-9096.1000192

Поступила/отрецензирована/принята к печати

Received/Reviewed/Accepted

17.06.2024/13.09.2024/14.09.2024

Заявление о конфликте интересов / Conflict of Interest Statement

Авторами О.А. Мокиенко, М.Р. Исаевым и П.Д. Бобровым исследование выполнено по государственному заданию Минобрнауки России для Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (регистрационный номер 1021062411635-8-3.1.4, тема №3). Авторами Р.Х. Люкмановым, Е.С. Иконниковой, А.Н. Черкасовой, Н.А. Супоновой и М.А. Пирадовым исследование выполнено по государственному заданию Минобрнауки России для Научного центра неврологии (регистрационный номер 122041800162-9). 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 study was conducted by O. Mokienko, M. Isaev, and P. Bobrov on state assignment by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of The Russian Academy of Sciences (Registration No 1021062411635-8-3.1.4, topic No 3). The study was conducted by R. Lyukmanov, E. Ikonnikova, A. Cherkasova, N. Suponeva and M. Piradov on state assignment by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Research Center of Neurology (Registration No 122041800162-9). 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.

Мокиенко О.А. <https://orcid.org/0000-0002-7826-5135>
 Люкманов Р.Х. <https://orcid.org/0000-0002-8671-5861>
 Бобров П.Д. <https://orcid.org/0000-0003-2566-1043>
 Исаев М.Р. <https://orcid.org/0000-0002-3907-5056>
 Иконникова Е.С. <https://orcid.org/0000-0001-6836-4386>
 Черкасова А.Н. <https://orcid.org/0000-0002-7019-474X>
 Супонева Н.А. <https://orcid.org/0000-0003-3956-6362>
 Пирадов М.А. <https://orcid.org/0000-0002-6338-0392>