



Интерфейс мозг—компьютер, основанный на спектроскопии в ближней инфракрасной области, в двигательной реабилитации после инсульта: описание серии случаев

Р.Х. Люкманов¹, М.Р. Исаев², О.А. Мокиенко^{1,2}, П.Д. Бобров², Е.С. Иконникова¹, А.Н. Черкасова¹, Н.А. Супонева¹

¹ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия;

²ФГБНУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», Москва, Россия

Аннотация

Введение. Неинвазивные нейрокомпьютерные интерфейсы позволяют проводить тренировки представления движения с предъявлением обратной связи в двигательной реабилитации пациентов неврологического профиля. В настоящий момент практически не изучено применение интерфейса мозг—компьютер (ИМК) на основе регистрации спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИКС) в двигательной реабилитации.

Цель исследования — оценить возможность применения БИКС-ИМК для проведения тренировок представления движения руки в комплексной реабилитации пациентов после инсульта.

Материалы и методы. В данное пилотное исследование включали клинически стабильных пациентов с постинсультным парезом руки лёгкой или средней степени выраженности. Пациенты получали 10 тренировок представления движения под контролем БИКС-ИМК, каждая длительностью по 9 мин, в дополнение к стандартной реабилитационной программе. В качестве показателя качества управления БИКС-ИМК оценивали достигнутый процент времени правильного распознавания классификатором ментального состояния пациента. Функцию руки определяли по шкалам ARAT и Фугл-Мейера.

Результаты. В исследование были включены и завершили его 5 пациентов с давностью инсульта от 1 дня до 12 мес. Все пациенты достигли качества управления БИКС-ИМК выше случайного (41–68%). Клинически значимое улучшение двигательной функции руки достигнуто у 3 пациентов по тесту ARAT, у одного из них — также по шкале Фугл-Мейера. В процессе тренировок все пациенты отмечали сонливость.

Заключение. Пациенты после инсульта способны управлять исследованной системой БИКС-ИМК. Для увеличения эффективности тренировок рекомендовано изменить сценарий предъявления обратной связи, увеличить продолжительность тренировок, включить в аппаратный комплекс функциональную электромиостимуляцию.

Ключевые слова: инсульт; реабилитация; представление движения; интерфейс мозг—компьютер; спектроскопия в ближней инфракрасной области; нейробиоуправление

Этическое утверждение. Исследование выполнено неинвазивным методом в соответствии с этическими нормами Хельсинкской декларации. Протокол исследования одобрен Локальным этическим комитетом ФГБНУ «Научный центр неврологии» (заключение № 5-4/22 от 01.06.2022). Все пациенты подписали информированное согласие.

Источник финансирования. Работа Люкманова Р.Х., Иконниковой Е.С., Черкасовой А.Н., Супоновой Н.А. выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации ФГБНУ «Научный центр неврологии» на 2021–2023 годы (тема № 210). Работа Боброва П.Д., Исаева М.Р., Мокиенко О.А. выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации ФГБНУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН» на 2021–2023 гг.

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

Адрес для корреспонденции: 125367, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, д. 80. ФГБНУ «Научный центр неврологии». E-mail: lesya.md@yandex.ru. Мокиенко О.А.

Для цитирования: Люкманов Р.Х., Исаев М.Р., Мокиенко О.А., Бобров П.Д., Иконникова Е.С., Черкасова А.Н., Супонева Н.А. 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):82–88.

DOI: <https://doi.org/10.54101/ACEN.2023.4.10>

Поступила 03.03.2023 / Принята в печать 20.03.2023 / Опубликовано 25.12.2023

Brain–Computer Interface Using Functional Near-Infrared Spectroscopy for Post-Stroke Motor Rehabilitation: Case Series

Roman Kh. Lyukmanov¹, Mikhail R. Isaev², Olesya A. Mokievko^{1,2}, Pavel D. Bobrov², Ekaterina S. Ikonnikova¹, Anastasiia N. Cherkasova¹, Natalya A. Suponeva¹

¹Research Center of Neurology, Moscow, Russia;

²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Introduction. Non-invasive brain–computer interfaces (BCIs) enable feedback motor imagery [MI] training in neurological patients to support their motor rehabilitation. Nowadays, the use of BCIs based on functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for motor rehabilitation is yet to be investigated.

Objective: To evaluate the potential fNIRS BCI use in hand MI training for comprehensive post-stroke rehabilitation.

Materials and methods. This pilot study included clinically stable patients with mild-to-moderate post-stroke hand paresis. In addition to the standard rehabilitation, the patients underwent 10 nine-minute MI fNIRS BCI training sessions. To evaluate the quality of fNIRS BCI control, we assessed the percentage of time during which the classifier accurately detected patient's mental state. We scored the hand function using the Action Research Arm Test (ARAT) and the Fugl-Meyer Assessment (FMA).

Results. The study included 5 patients at 1 day to 12 months of stroke. All the participants completed the study. All study participants achieved BCI control rates higher than random (41–68%). While three patients demonstrated the clinically significant improvements in their ARAT scores, one of them also showed an improvement in the FMA score. All the participants reported experiencing drowsiness during training.

Conclusions. Post-stroke patients can operate the fNIRS BCI system under investigation. We suggest adjusting the feedback system, extending the duration of training, and incorporating functional electromyostimulation to enhance training effectiveness.

Keywords: stroke; rehabilitation; motor imagery; brain–computer interface; near-infrared spectroscopy; neuro-bio-control

Ethics approval. The study was conducted non-invasively in accordance with the ethics of the Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by the Local Ethics Committee of the Research Center of Neurology (Protocol No. 5-4/22, 1 June 2022). All the participants signed informed consent.

Source of funding. The study was conducted by R.Kh. Lyukmanov, E.S. Ikonnikova, A.N. Cherkasova, and N.A. Suponeva on state assignment by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Research Center of Neurology for 2021–2023 (research project No. 210). The study was conducted by P.D. Bobrov, M.R. Isaev, and O.A. Mokievko 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 RAS for 2021–2023.

Conflict of interest. The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For correspondence: 125367, Russia, Moscow, Volokolamskoye shosse, 80. Research Center of Neurology. E-mail: lesya.md@yandex.ru. Mokievko O.A.

For citation: Lyukmanov R.Kh., Isaev M.R., Mokievko O.A., Bobrov P.D., Ikonnikova E.S., Cherkasova A.N., Suponeva N.A. Brain–computer interface using functional near-infrared spectroscopy for post-stroke motor rehabilitation: case series. *Annals of Clinical and Experimental Neurology*. 2023;17(4):82–88. (In Russ.)

DOI: <https://doi.org/10.54101/ACEN.2023.4.10>

Received 03.03.2023 / Accepted 20.03.2023 / Published 25.12.2023

Введение

Нейрокомпьютерные интерфейсы (интерфейсы мозг–компьютер, ИМК) — группа технологий, преобразующих сигналы активности мозга в команды внешнему устройству. Неинвазивные ИМК позволяют проводить тренировки представления движения с предъявлением обратной связи в двигательной реабилитации пациентов неврологического профиля. На сегодняшний день доказательная база применения ИМК, основанных на регистрации сенсорно-моторного ритма ЭЭГ (ЭЭГ-ИМК), в постинсультной реабилитации насчитывает несколько систематических обзоров [1–4]. Нами также было проведено рандомизированное контролируемое исследование эффективности применения ЭЭГ-ИМК с визуальной и экзоскелет-опосредованной кинестетической обратной связью у пациентов,

перенёсших инсульт [5, 6]. Курс тренировок представления движения под контролем данной технологии способствовал улучшению шарового и шипкового захватов кисти. Однако применение нейрокомпьютерного интерфейса, основанного на регистрации ЭЭГ, сопровождается рядом трудностей: необходимостью нанесения на волосистую поверхность головы геля для ЭЭГ-электродов, возникновением артефактов сигнала при движении пациента и сокращениях мышц во время тренировки, низким пространственным разрешением детекции источника сигнала.

ИМК на основе регистрации спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИКС-ИМК) — разновидность неинвазивных нейроинтерфейсов, также позволяющих поддерживать тренировки представления движения с предъявлением обратной связи. Источниками активности

мозга в данном случае могут являться сразу несколько параметров: изменение концентрации окси-, дезокси- или общего гемоглобина на глубине до 4 см от поверхности головы. Для применения данной технологии нет необходимости использовать электродный гель, а движения пациента во время тренировок не приводят к серьёзным искажениям сигнала. На настоящий момент БИКС-ИМК остаётся практически неизученным в отношении применения в постинсультной реабилитации. В недавнем обзоре [7], посвящённом методам биологической обратной связи, основанным на оптической визуализации, упомянуто только одно исследование БИКС-ИМК в постинсультной реабилитации [8]. Протокол процедуры, описанный в этой работе, предполагал не классификацию сигнала, а предъявление его амплитуды в виде цвета и высоты отображаемых на экране столбиков.

Перед разработкой протокола для рандомизированного контролируемого исследования эффективности БИКС-ИМК в качестве первичной апробации необходимо поисковое исследование данной технологии с оценкой достижимого уровня онлайн-распознавания сигнала.

Цель настоящего исследования — оценить возможность применения нейрокомпьютерного интерфейса на основе БИКС для проведения тренировок представления движения руки с индивидуально подобранной парадигмой в комплексной реабилитации пациентов после инсульта.

Материалы и методы

Дизайн исследования

Данное пилотное исследование представляет собой описание серии клинических случаев реабилитации после инсульта с включением в стандартную лечебную программу курса ментальных тренировок под контролем БИКС-ИМК.

Исследование проведено на базе Института нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Научный центр неврологии» в июне–октябре 2022 г. В исследовании принимали участие пациенты, проходящие плановую реабилитацию после инсульта на госпитальном этапе. Участие каждого пациента длилось в сумме 12 дней по схеме: 5 тренировочных дней, 2 выходных дня, 5 тренировочных дней. Тренинги с технологией БИКС-ИМК дополняли стандартную программу медицинской реабилитации. Перед первым тренингом и после последнего тренинга БИКС-ИМК проводилась оценка двигательной функции руки с помощью международных валидированных шкал.

Протокол исследования одобрен Локальным этическим комитетом ФГБНУ «Научный центр неврологии» (заключение № 5-4/22 от 01.06.2022). Участие пациентов в данном исследовании было полностью добровольным, все пациенты подписали информированное согласие. Протокол исследования был заранее зарегистрирован в локальной базе протоколов научных проектов Института нейрореабилитации и восстановительных технологий (ID № 210).

Критерии участия

Критерии включения в исследование: первичный или вторичный инсульт с очагом супратенториальной локализа-

ции (с подтверждением по компьютерной или магнитно-резонансной томографии), наличие в клинической картине пареза дистальной части верхней конечности лёгкой или умеренной степени выраженности, давность инсульта от 1 дня до 12 мес включительно, клинически стабильное состояние без угрозы для жизни, добровольное согласие на участие в исследовании.

Критерии невключения: наличие в клинической картине тяжёлых нарушений речи, зрения или когнитивных функций, контрактуры тканей кисти.

Базовый курс реабилитации

Всем пациентам в течение 2 нед проведён курс реабилитации, состоящий из индивидуальных занятий лечебной гимнастикой с инструктором-методистом, нервно-мышечной электростимуляции мышц нижних конечностей, лечебного массажа, роботизированной механотерапии с биологической обратной связью для восстановления мелкой моторики в кисти, механотерапии посредством тренажёра-велозоометра. Все указанные процедуры проводились ежедневно, кроме выходных, каждая — по 10 сеансов.

Тренинг с БИКС-ИМК

Тренировки представления движения с предъявлением обратной связи посредством БИКС-ИМК проводились в дополнение к базовому курсу реабилитации ежедневно, кроме выходных. Каждый пациент прошёл 10 сеансов тренинга.

В исследовании был использован неинвазивный нейрокомпьютерный интерфейс, основанный на распознавании BOLD-сигнала коры головного мозга при представлении движения рук, выраженного в изменении относительных концентраций окисленного и неокисленного гемоглобина, оценённых посредством спектроскопии в ближней инфракрасной области. Для спектроскопии в ближней инфракрасной области применяли аппарат «NIRScout» («NIRxMedicalTechnologies»), содержащий 16 источников излучения и 8 детекторов. Протокол эксперимента, методика фильтрации и классификации сигналов активности головного мозга, а также программное обеспечение были описаны нами ранее [9]. Визуальная обратная связь предъявлялась пациенту на 22-дюймовом компьютерном мониторе. Общая схема технологии представлена на рис. 1.

Каждому пациенту — участнику эксперимента врач-исследователь индивидуально подбирал тип движения, которое необходимо было представлять во время тренингов с нейроинтерфейсом. При этом выбиралось движение из теста ARAT, выполнение которого было наиболее затруднительно для конкретного пациента, и за которое, соответственно, присваивался наименьший балл по данному тесту. Перед проведением каждого тренинга исследователь просил пациента выполнить целевое движение несколько раз, пока он не подтвердит готовность ментально воспроизвести данное движение (прайминг). Если движение предполагало удержание какого-либо предмета из теста ARAT, то он предоставлялся пациенту во время прайминга.

Во время процедуры на голову пациента надевали шапочку с источниками и детекторами БИКС. В процессе тренинга пациент сидел за столом перед компьютерным мони-

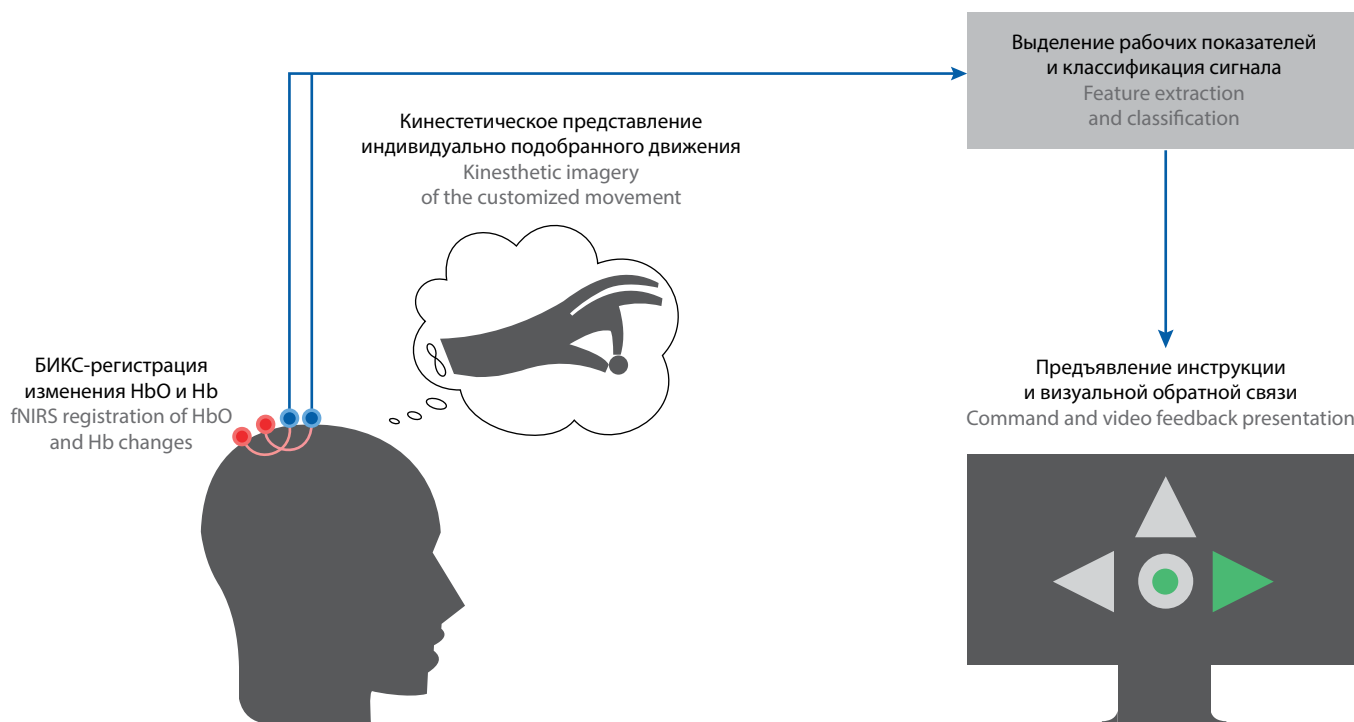


Рис. 1. Общая схема системы БИКС-ИМК и процесса тренировки (после проведения «прайминга»).

HbO — концентрация оксигемоглобина, Hb — концентрация дезоксигемоглобина.

Fig. 1. The fNIRS BCI and post-priming training flow chart
Hb, deoxyhemoglobin; HbO, oxyhemoglobin.

тором, его руки лежали на подлокотниках кресла или на столе перед ним в удобном положении. В центре тёмного экрана монитора находился круг, служащий для фиксации взгляда, вокруг него расположены 3 стрелки для обозначения инструкций изменяющимся цветом. Пациент выполнял одну из трёх 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 задачи, соответствующей представлению движения, фиксирующая взор метка в середине экрана градиентно принимала зелёный цвет. При предъявлении инструкции расслабиться цвет метки не изменялся при любом ответе классификатора.

Одна тренировка длилась 9 мин, включала 4 блока, каждый блок включал 2 инструкции для левой руки и 2 — для правой, предъявляемые в случайном порядке с чередованием через покой. Каждая инструкция предъявлялась по 15 с. Перед каждой инструкцией предъявлялась подготовительная инструкция длительностью 2 с.

Получение и обработка сигнала

Источники и детекторы излучения располагались в гнездах электроэнцефалографической шапки. Частота регистрации сигнала составляла 15,625 Гц. Регистрируемые интенсивности излучения пересчитывались в относительные концентрации окси- (HbO) и дезоксигемоглобина (Hb) с помощью модифицированного закона Бугера–Ламберта–Бера. Для классификации активных состояний сигнал фильтровался с помощью фильтра верхних частот Чебышева первого

рода первого порядка с неравномерностью в полосе пропускания 1 дБ и частотой среза 0,005 Гц. Для классификации покой/активное состояние сигнал фильтровался с помощью полосового фильтра Чебышева первого рода второго порядка с неравномерностью в полосе пропускания 1 дБ. Частоты среза подбирали так, чтобы обеспечить нулевой сдвиг фаз на частоте предъявления инструкций. Для классификации использовали линейный дискриминантный анализ с дообучением на предыдущих блоках текущей сессии и предыдущих экспериментальных сессиях данного испытуемого. Классификация шла ступенчато: сначала классификация покой/активное состояние, в случае распознавания активного состояния — классификация левая рука/правая рука. Классифицировались секундные интервалы записи.

Конечные точки

В данном пилотном исследовании мы в первую очередь анализировали качество распознавания классификатором нейроинтерфейса ментальных состояний пациента в процессе тренировки. Данный показатель выражен в доле верно распознанных интервалов записи от общего числа классифицированных интервалов, при его значении более 33% распознавание сигнала считается выше случайного, т.к. пациент выполняет по инструкции 3 ментальные задачи (100%:3 ≈ 33%).

Для оценки двигательной функции руки до и после курса реабилитации мы применяли тест ARAT (максимальное возможное значение — 57 баллов, клинически значимое увеличение баллов — на 6 единиц в хроническом периоде инсульта и на 12–17 единиц в остром периоде инсульта)

[10, 11] и раздел шкалы Фугл-Мейера для верхней конечности (максимальное возможное значение — 126 баллов, клинически значимое увеличение баллов — на 5 единиц) [10, 12]. Оценку по двигательным шкалам проводил обученный врач, не знавший об участии пациента в исследовании.

Статистическая обработка данных

Достигнутый процент распознавания классификатором сигналов активности мозга представлен в медиане и 25-м, 75-м квартилях. Аналитика проведена с помощью пакета «MatLab R2019b».

Поскольку исследование является несравнительным и поисковым с описанием серии случаев, другие методы статистической обработки не применяли.

Результаты

Пациенты

Скрининг для участия в исследовании прошли 8 пациентов, из них 3 не прошли по критериям включения, 5 были включены в исследование. Основные данные по участникам исследования представлены в табл. 1. Все 5 пациентов завершили участие в исследовании без преждевременного выбытия.

Таблица 1. Демографические и основные исходные данные пациентов

Table 1. Patient demographics and baseline characteristics

Пациент Patient	Пол Sex	Возраст, лет Age, years	Тип инсульта Stroke type	Латерализация очага Stroke lesion side	Давность инсульта, мес Stroke time, months ago	Балл по шкале ARAT APAT score	Балл по шкале Фугл-Мейера (рука) FMA score (hand)
П1	Мужской Male	71	Первичный Primary	Левое Left	12	44	107
П2	Мужской Male	58	Первичный Primary	Левое Left	12	39	104
П3	Мужской Male	58	Вторичный Secondary	Правое Right	8 и 2	35	114
П4	Мужской Male	49	Первичный Primary	Правое Right	< 1	35	116
П5	Женский Female	43	Первичный Primary	Левое Left	1	52	122

Таблица 2. Достигнутые показатели качества управления нейроинтерфейсом и улучшения по двигательным шкалам

Table 2. Resulting BCI control and motor score improvement

Пациент Patient	Распознавание классификатора, % Classifier detection, %	Улучшение в баллах по шкале ARAT ARAT score improvement	Улучшение по шкале Фугл-Мейера, баллы FMA score improvement
П1	68 [57; 73]	6*	1
П2	41 [37; 47]	4	3
П3	45 [41; 47]	6*	0
П4	45 [34; 50]	20*	9*
П5	49 [46; 59]	5	3

Примечание. * Клинически значимое улучшение, с учётом давности инсульта [10].

Note. *Clinically significant improvement as adjusted by the stroke time [10].

Для применения парадигмы представления движения во время тренировок были выбраны следующие типы движений руки: для пациентов П1, П3 и П4 — «Взять и удерживать 1-м и 4-м пальцами шарик диаметром 6 мм», для П2 — «Взять и удерживать 1-м и 2-м пальцами шарик диаметром 6 мм», для П5 — «Взять и удерживать 1-м и 4-м пальцами шарик диаметром 1,5 мм».

Качество управления и улучшение двигательной функции

В процессе представления движения с помощью БИКС-ИМК для всех пациентов был достигнут уровень распознавания сигнала выше случайного (> 33%; табл. 2).

После курса комплексной реабилитации госпитального этапа с дополнительным включением тренировок представления движения посредством БИКС-ИМК у всех пациентов наблюдалось улучшение баллов по двигательным шкалам (рис. 2). При этом клинически значимое улучшение двигательной функции руки достигнуто у 3 пациентов по тесту ARAT, а у 1 из них — также по шкале Фугл-Мейера (табл. 2).

Тренировки представления движения под контролем БИКС-ИМК в данной модификации не сопровождались нежелательными явлениями, однако все пациенты отмечали сонливость непосредственно в процессе тренировок, в связи с чем к концу каждой тренировки им было сложно концентрировать внимание и выполнять инструкцию.

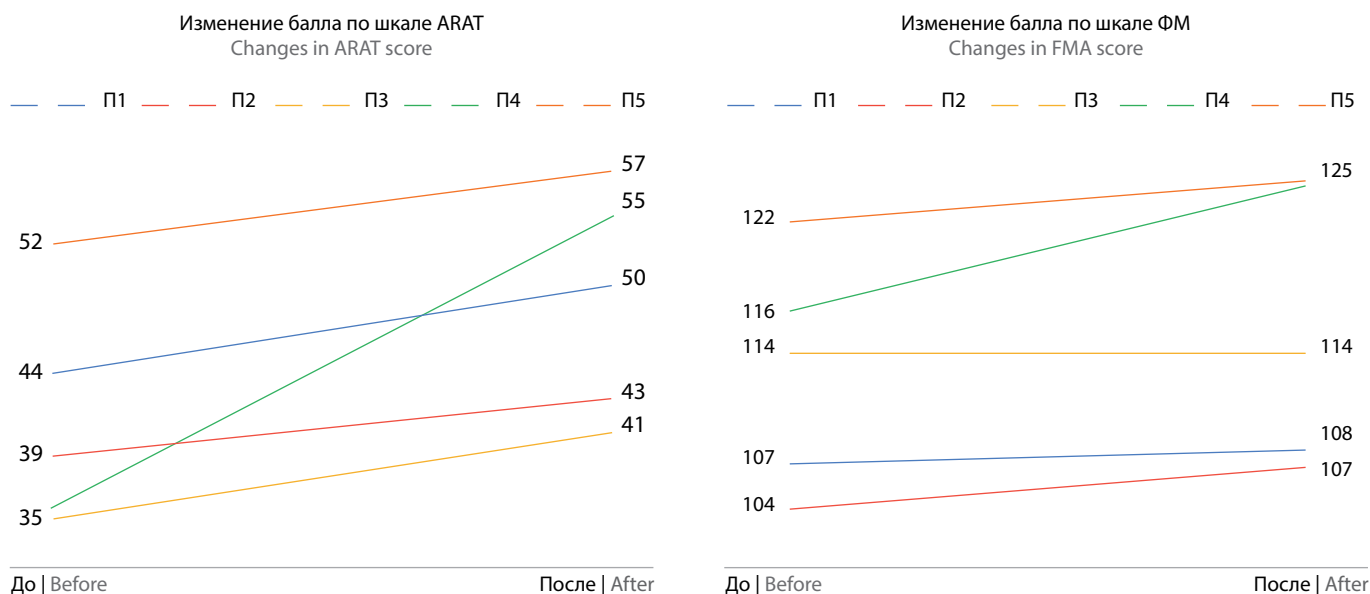


Рис. 2. Изменение показателей по двигательным шкалам у пациентов в процессе реабилитации с включением тренировок БИКС-ИМК.

Fig. 2. Changes in motor scores during rehabilitation and additional fNIRS BCI training.

Обсуждение

В данном исследовании мы продемонстрировали возможность применения нейрокомпьютерного интерфейса на основе БИКС для проведения тренировок представления движения руки с индивидуально подобранной парадигмой в комплексной реабилитации пациентов после инсульта. Все участники исследования достигли уровня управления нейроинтерфейсом выше случайного.

Общая экспозиция тренировок представления движения в нашем исследовании составляла 1,5 ч (10 тренировок по 9 мин). Это значение меньше, чем в других проведённых исследованиях неинвазивных ИМК, в которых продолжительность тренировок составляла 0,5–1,5 ч, а общая экспозиция — 5–27 ч [13]. Однако даже при такой продолжительности тренировок у пациентов развивалась сонливость, в связи с чем, по результатам данного пилотного исследования, предполагается разумным изменить сценарий предъявления обратной связи, сделав его в игровой форме или с более разнообразной визуализацией, а также предусмотреть перерывы между блоками в рамках каждой тренировки. Следует отметить, что проблема сонливости в процессе проведения тренировок представления движения также отмечена в других работах [13].

У всех пациентов, прошедших тренировки с технологией БИКС-ИМК в рамках данного исследования, хотя бы по одной шкале выявлено улучшение двигательной функции, а у 3 пациентов — достижение клинически значимого улучшения. Однако дизайн исследования не предусматривал группу сравнения, а спектр критериев включения был достаточно широким, что является рядом ограничений данного поискового исследования, поэтому невозможно доказать влияние тренировок БИКС-ИМК на достигнутое улучшение. Тем не менее эффективность тренировок представления движения под контролем неинвазивных ИМК уже показана в ряде систематических обзоров и метаанализов по результа-

там многочисленных рандомизированных контролируемых исследований [1–4, 13]. В настоящее время ведётся поиск наиболее удобных для практического применения систем ИМК и сценариев предъявления обратной связи [14].

Несмотря на то что БИКС-ИМК является более удобной технологией, чем ЭЭГ-ИМК, в подавляющем большинстве исследований, вошедших в существующие на сегодняшний день систематические обзоры, изучался именно ЭЭГ-ИМК. Только в одном рандомизированном исследовании с участием 20 пациентов М. Mihara и соавт. продемонстрировали эффективность БИКС-ИМК в реабилитации пациентов с подкорковым инсультом: 6 тренировок по 20 мин способствовали более выраженному улучшению двигательной функции кисти по шкале Фугл-Мейера в основной группе по сравнению с группой имитации БИКС-ИМК [8]. Следует отметить, что, в отличие от системы, используемой в нашей работе, технология БИКС-ИМК, применявшаяся в исследовании М. Mihara и соавт., не подразумевала онлайн-классификации сигнала. При таком подходе необходимы дополнительные и не вполне очевидные действия для преобразования регистрируемого сигнала в команды для запуска работы экзоскелета или электростимуляции, если эти методы используются для дополнительной сенсорной обратной связи.

Отличительная особенность протокола нашего исследования — персонализированный подбор типа движения для его последующего представления в процессе тренировок. При этом выбирался тип движения, представленный в используемой в данном исследовании клинической шкале ARAT. Данный подход соответствует современным представлениям о постановке индивидуальной цели реабилитации для каждого пациента и позволяет использовать инструмент «goal attainment scaling» [10].

В недавно опубликованном метаанализе был показан более выраженный восстановительный эффект систем ИМК,

использующих функциональную электромиостимуляцию, в сравнении с устройствами, оснащёнными экзоскелетом для предъявления кинестетической обратной связи, или только визуальной обратной связью [13]. Поэтому на следующем этапе доработки технологии в аппаратный комплекс БИКС-ИМК рекомендовано включение функциональной электромиостимуляции, управляемой сигналами активности мозга в процессе представления движения.

Список источников | References

1. Monge-Pereira E., Ibañez-Pereda J., Alguacil-Diego I.M. et al. Use of electroencephalography brain-computer interface systems as a rehabilitative approach for upper limb function after a stroke: a systematic review. *PM. R.* 2017;9(9):918–932. DOI: 10.1016/j.pmrj.2017.04.016
2. Baniqued P.D.E., Staney E.C., Awais M. et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review. *J. Neuroeng Rehabil.* 2021;18 (1):15. DOI: 10.1186/s12984-021-00820-8
3. 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;13(1):56. DOI: 10.3390/brainsci13010056
4. Carvalho R., Dias N., Cerqueira J.J. Brain-machine interface of upper limb recovery in stroke patients rehabilitation: a systematic review. *Physiother. Res. Int.* 2019;24(2):e1764. DOI: 10.1002/prj.1764
5. Frolov A.A., Mokienko O., Lyukmanov R. et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based Brain-Computer Interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial. *Front. Neurosci.* 2017;11:400. DOI: 10.3389/fnins.2017.00400
6. Люкманов Р.Х., Азиатская Г.А., Мокиенко О.А. и др. Интерфейс мозг-компьютер в постинсультной реабилитации: клинично-нейропсихологическое исследование. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2018;118(8):43–51. Lyukmanov R.Kh., Aziatskaya GA, Mokienko O.A. et al. Post-stroke rehabilitation training with a brain-computer interface: a clinical and neuropsychological study. *Zhurnal Nevrologii i Psikiatrii imeni S.S. Korsakova.* 2018;118(8):43–51. (In Russ.). DOI: 10.17116/jnevro201811808143
7. Soekadar S.R., Kohl S.H., 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

Информация об авторах

Люкманов Роман Харисович — к.м.н., н.с., руководитель группы нейроинтерфейсов Института нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-8671-5861>

Исаев Михаил Романович — м.н.с. лаб. математической нейробиологии обучения ФГБНУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3907-5056>

Мокиенко Олеся Александровна — к.м.н., н.с. группы нейроинтерфейсов Института нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия; с.н.с. ФГБНУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7826-5135>

Бобров Павел Дмитриевич — к.б.н., зав. лаб. математической нейробиологии обучения ФГБНУ «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2566-1043>

Иконникова Екатерина Сергеевна — м.н.с. группы нейроинтерфейсов Института нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6836-4386>

Черкасова Анастасия Николаевна — м.н.с. группы нейроинтерфейсов Института нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7019-474X>

Супонева Наталья Александровна — д.м.н., член-корреспондент РАН, директор, Институт нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3956-6362>

Вклад авторов: Люкманов Р.Х. — создание концепции исследования, проведение исследования, разработка методологии; Исаев М.Р. — курирование данных, анализ данных, программное обеспечение; Мокиенко О.А. — создание концепции исследования, анализ данных, подготовка текста статьи; Бобров П.Д. — поиск финансирования, разработка методологии, программное обеспечение; Иконникова Е.С. — проведение исследования; Черкасова А.Н. — проведение исследования; Супонева Н.А. — создание концепции исследования, поиск финансирования, руководство научно-исследовательской работой.

Заключение

В данном пилотном исследовании продемонстрирована возможность применения БИКС-ИМК для проведения тренировок представления движения руки с индивидуально подобранной парадигмой в комплексной реабилитации пациентов после инсульта, а также определены пути совершенствования данной технологии и протокола тренировок.

8. 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;44(4):1091–1098. DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.674507
9. Исаев М.Р., Бобров П.Д. Влияние выбора стратегии формирования обучающего множества и способа фильтрации на эффективность ИМК, основанного на спектрометрии в ближнем инфракрасном диапазоне. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2022;72(5):728–738. Isaev M.R., Bobrov P.D. Effect of session to session learning and filtration method on the performance of BCI based on near infrared spectroscopy. *Zhurnal vysshey nernoy deatel'nosti im. I.P. Pavlova.* 2022;72(5):728–738. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0044467722050070
10. Мокиенко О.А., Супонева Н.А. (ред.) Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности. Клинические рекомендации. М., 2018:64. Mokienko O.A., Suponeva N.A. (eds.) Stroke in adults: central paresis of the upper limb. Clinical guidelines. Moscow; 2018:64. (In Russ.)
11. Carroll D. A quantitative test of upper extremity function. *J. Chronic Dis.* 1965;18: 479–491. DOI: 10.1016/0021-9681(65)90030-5
12. Fugl-Meyer A.R., Jääskö L., Leyman I. et al. The post-stroke hemiplegic patient. I. A method for evaluation of physical performance. *Scand. J. Rehabil. Med.* 1975;7(1):13–31.
13. Xie Y.L., Yang Y.X., 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;16:949575. DOI: 10.3389/fnins.2022.949575
14. Simon C., Bolton D.A.E., Kennedy N.C. et al. Challenges and opportunities for the future of brain-computer interface in neurorehabilitation. *Front. Neurosci.* 2021;15:699428. DOI: 10.3389/fnins.2021.699428

Information about the authors

Roman Kh. Lyukmanov — Cand. Sci. (Med.), researcher, Head, Brain-computer interface group, Institute of Neurorehabilitation, Research Center of Neurology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-8671-5861>

Mikhail R. Isaev — junior researcher, Laboratory of mathematical neurobiology of learning department, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3907-5056>

Olesya A. Mokienko — Cand. Sci. (Med.), researcher, Brain-computer interface group, Institute of Neurorehabilitation, Research Center of Neurology, Moscow, Russia; senior researcher, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7826-5135>

Pavel D. Bobrov — Cand. Sci. (Biol.), Head, Laboratory of mathematical neurobiology of learning department, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2566-1043>

Ekaterina S. Ikonnikova — junior researcher, Brain-computer interface group, Institute of Neurorehabilitation, Research Center of Neurology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6836-4386>

Anastasiia N. Cherkasova — junior researcher, Brain-computer interface group, Institute of Neurorehabilitation, Research Center of Neurology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7019-474X>

Natalya A. Suponeva — D. Sci. (Med.), Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute of Neurorehabilitation, Research Center of Neurology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3956-6362>

Author contribution: Lyukmanov R.Kh. — creating a research concept, conducting research, developing methodology; Isaev M.R. — data curation, data analysis, software; Mokienko O.A. — creating a research concept, data analysis, preparing the text of an article; Bobrov P.D. — search for funding, development of methodology, software; Ikonnikova E.S. — conducting research; Cherkasova A.N. — conducting research; Suponeva N.A. — creation of a research concept, search for funding, management of research work.