

фМРТ-ЭЭГ-корреляции в интерактивном исследовании церебральной моторной сети при ишемическом инсульте

Н.А. Хрущева^{1,2}, К.В. Калгин³, Д.А. Новиков¹, Д.В. Клебанский^{1,3}, А.А. Савелов^{3,4},
А.А. Тулупов^{3,4}, М.Б. Штарк¹

¹ *ФИЦ фундаментальной и трансляционной медицины
630060, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2*

² *Новосибирский государственный медицинский университет Минздрава России
630091, г. Новосибирск, Красный пр., 52*

³ *Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

⁴ *Институт «Международный томографический центр» СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3а*

Резюме

Технологии нейробиоуправления (НБУ) обеспечивают интерактивный режим саморегуляции моторной системы мозга в реабилитации инсульта. Слияние нейрофизиологических сигналов двух модальностей, гемодинамического (функциональная МРТ) и электрофизиологического (ЭЭГ), в контуре обратной связи позволяет восполнить ограничения каждой технологии нейровизуализации в отдельности и помогает раскрыть церебральные механизмы двигательного (пере)обучения. Цель исследования – изучение согласованных изменений сигнала фМРТ и мощности сенсомоторного ритма ЭЭГ во время воображения движения ног в сессиях фМРТ-ЭЭГ-НБУ у пациента с инсультом. **Материал и методы.** Пациент с правосторонним гемипарезом после инсульта давностью 6 недель обучался воображению движения паретичной ногой в пяти сеансах фМРТ-ЭЭГ-НБУ. Шкала обратной связи на 2/3 определялась уровнем усиления сигнала фМРТ из дополнительной моторной области (SMA) и представительства ноги в моторной коре (M1^F) левого полушария и на 1/3 – десинхронизацией ритмов ЭЭГ в мю- (8–13 Гц) и бета2-диапазонах (18–26 Гц) в центральной области (электрод Cz по системе 10–20). **Результаты и их обсуждение.** В большинстве прогонов НБУ пациент добивался десинхронизации мю- и бета2-ритмов ЭЭГ и увеличения сигнала фМРТ регионов интереса. Активация левой M1^F ассоциировалась с десинхронизацией мю-ритмов, что согласуется с данными литературы. Подавление как мю-, так и бета2-диапазонов коррелировало ($p < 0,05$) с активацией премоторной коры билатерально, первичной моторной коры справа, а также переднего таламуса и переднего островка правого полушария, указывая на вовлечение сохранного полушария в планирование и контроль движения. Преобладание активации гомологичных регионов неповрежденного полушария, а также вовлечение узлов сети значимости и дорзальной сети внимания согласуется с гипотезой о глобальной функциональной перестройке мозга после инсульта; о том же свидетельствует укрепление внутрислоушарной функциональной связи SMA–M1^F билатерально к концу курса. **Заключение.** Впервые проведен анализ взаимосвязей сигналов фМРТ и ЭЭГ в сеансах на бимодальной платформе НБУ у пациента с постинсультным парезом ноги. Показано, что волевое управление активностью M1^F и SMA пораженного полушария активирует также гомологичные регионы противоположного полушария и рекрутирует узлы когнитивных сетей, демонстрируя ассоциации с мощностью мю- и бета2-диапазонов ЭЭГ на центральных отведениях.

Ключевые слова: нейробиоуправление, одновременная запись фМРТ-ЭЭГ, фМРТ-ЭЭГ-корреляции, воображение движения, инсульт.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ фундаментальной и трансляционной медицины.

Благодарности. Савелов А.А. и Тулупов А.А. благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за доступ к МРТ- и ЭЭГ-оборудованию.

Автор для переписки. Хрущева Н.А., e-mail: Khrunks@mail.ru

Для цитирования. Хрущева Н.А., Калгин К.В., Новиков Д.А., Клебанский Д.В., Савелов А.А., Тулупов А.А., Штарк М.Б. фМРТ-ЭЭГ-корреляции в интерактивном исследовании церебральной моторной сети при ишемическом инсульте. *Сиб. науч. мед. ж.* 2026;46(1):183–193. doi: 10.18699/SSMJ20260117

fMRI-EEG correlations in an interactive study of the cerebral motor network in ischemic stroke

N.A. Khrushcheva^{1,2}, K.V. Kalgin³, D.A. Novikov¹, D.V. Klebansky^{1,3}, A.A. Savelov^{3,4}, A.A. Tulupov^{3,4}, M.B. Shtark¹

¹ *Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine
630060, Novosibirsk, Timakova st., 2*

² *Novosibirsk State Medical University of Minzdrav of Russia
630091, Novosibirsk, Krasny ave., 52*

³ *Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2*

⁴ *International Tomography Center of SB RAS
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 3a*

Abstract

Neurofeedback (NF) technologies provide an interactive mode of self-regulation of the brain motor system in stroke rehabilitation. Simultaneous presentation of signals of two modalities, hemodynamic (functional MRI) and electrophysiological (EEG), in the feedback loop allows to compensate for the limitations of each neuroimaging technology and helps to reveal the cerebral mechanisms of motor recovery. Aim of the study was to investigate coordinated changes in fMRI signal and EEG sensorimotor rhythm power during leg movement imagination in fMRI-EEG-NF sessions in a patient with stroke. **Materials and methods.** A patient with right-sided hemiparesis after a 6-week stroke was trained to imagine movements of the paretic foot in five fMRI-EEG-NF sessions. The feedback scale was 2/3 determined by the level of fMRI signal amplification from the supplementary motor area (SMA) and foot representation in the motor cortex (M1^F) of the left hemisphere and 1/3 by desynchronization of EEG rhythms in the mu (8–13 Hz) and beta2 (18–26 Hz) frequency bands over the central midline region (electrode Cz according to the 10–20 system). **Results and discussion.** In most of the NF runs, the patient achieved desynchronization of the mu and beta2 rhythms of the EEG and an increase in the fMRI signal of the regions of interest. Activation of the left M1^F was associated with desynchronization of mu rhythms, which is consistent with the literature. Suppression of both mu and beta2 bands correlated ($p < 0.05$) with activation of the premotor cortex bilaterally, the right primary motor cortex, and the anterior thalamus and anterior insula of the right hemisphere, indicating the involvement of the intact hemisphere in motor planning and control. The predominance of activation of homologous regions of the undamaged hemisphere, as well as the involvement of the nodes of the salience network and the dorsal attention network are consistent with the hypothesis of global functional reorganization of the brain after stroke; the same is evidenced by the strengthening of the intrahemispheric functional connectivity SMA–M1^F bilaterally by the end of the course. **Conclusions.** For the first time, an analysis of the relationships between fMRI and EEG signals in sessions on the bimodal fMRI-EEG NF platform was performed in a patient with post-stroke foot paresis. It was shown that volitional control of the activity of M1^F and SMA of the affected hemisphere also activates homologous regions of the opposite hemisphere and recruits nodes of cognitive networks, demonstrating associations with the power of the mu- and beta2- band of EEG in the central leads.

Key words: neurofeedback, simultaneous fMRI-EEG recording, fMRI/EEG correlations, motor imagery, stroke.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study was supported by research project of the Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine.

Acknowledgments. Savelov A.A. and Tulupov A.A. thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for granting access to the MRI and EEG equipment.

Correspondence author. Khrushcheva N.A., e-mail: Khrunks@mail.ru

Citation. Khrushcheva N.A., Kalgin K.V., Novikov D.A., Klebansky D.V., Savelov A.A., Tulupov A.A., Shtark M.B. fMRI-EEG correlations in an interactive study of the cerebral motor network in ischemic stroke. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal.* 2026;46(1):183–193. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20260117

Введение

Способность человека обучиться произвольному контролю мощности сенсомоторных ритмов мозга лежит в основе идеомоторных тренировок в контуре систем «мозг–компьютер–интерфейс» и используется для совершенствования и/или протезирования двигательных навыков в реабилитации инсульта [1, 2]. ЭЭГ-ритмы в мю- (8–13 Гц) и бета2-диапазонах (18–26 Гц) у здоровых людей десинхронизируются на центральных электродах (Cz, C3 или C4) как при реальном, так и воображаемом движении конечностью, и потому традиционно служат мишенью в нейробиоуправлении (НБУ) [3, 4]. ЭЭГ, обладая превосходным временным разрешением, обеспечивает высокую точность регистрации мозговой динамики, но не локализует ее источник. С другой стороны, функциональная МРТ (фМРТ), основанная на сигнале, зависящем от уровня оксигенации крови (blood oxygenation level dependent, BOLD), хоть и с задержкой на 4–6 с, способна с точностью от 1 мм³ определять зоны активации, в том числе в глубинных отделах мозга [5]. Пространственная точность фМРТ, с одной стороны, помогает картировать функции мозга, с другой – открывает перспективы использования полученных функциональных карт для создания персонализированных систем управления нейропластичностью в интерактивном режиме технологий «мозг–компьютер–интерфейс». В сущности, фМРТ и ЭЭГ предлагают взаимодополняющие сигналы визуализации, а объединение данных, собранных одновременно, предлагает особенно полезный инструмент изучения динамики мозга в широком диапазоне пространственных и временных метрик. Исследования фМРТ-НБУ продемонстрировали возможность обучения пациентов на хронической стадии инсульта посредством воображения движения паретичной рукой активировать моторные области пораженного полушария [6, 7], управлять таламо-кортикальной функциональной связностью периинфарктной зоны [8] или латерализацией BOLD-сигнала первичной моторной коры (M1) на стороне повреждения [9]. Предполагается, что тренировки НБУ могут потенцировать нейропластичность, укрепляя связи между областями мозга [10], однако клиническую эффективность этих подходов еще предстоит изучить [9, 11].

Современные технические возможности и совершенствование методов обработки сигналов помогают решать задачу объединения двух модальностей в реальном времени и встраивать их в контур обратной связи [12, 13]. Бимодальная платформа НБУ, основанная на одновременной

регистрации и онлайн-обработке электромагнитного (ЭЭГ) и гемодинамического (фМРТ) сигнала, позволяет получить данные, не доступные этим технологиям в отдельности, и помогает понять сенсомоторные процессы, лежащие в основе двигательного обучения. Такую технологию (фМРТ-ЭЭГ-НБУ) мы называем «интерактивной терапией (стимуляцией) мозга» [14]. В ранних исследованиях одновременной записи фМРТ и ЭЭГ в протоколах НБУ обратная связь предъявлялась испытуемому только по одной из модальностей, а сигналы другой обрабатывались затем уже в автономном режиме, чтобы оценить их корреляты [15–17]. В дальнейшем реализована идея слияния обоих сигналов в метафоре обратной связи [11, 14, 18], однако анализ фМРТ-ЭЭГ-взаимосвязей не проводился.

Цель настоящей работы – изучение согласованных изменений BOLD-сигнала и мощности сенсомоторных ритмов мозга (мю- и бета2-диапазоны) во время воображения движения паретичной ногой в сессиях интерактивного тренинга по сигналу фМРТ и ЭЭГ (фМРТ-ЭЭГ-НБУ) у пациента с инсультом.

Материал и методы

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФИЦ фундаментальной и трансляционной медицины (протокол № 8 от 15 марта 2021 г.); перед началом процедур пациент подписал добровольное информированное согласие. Курс традиционной физической нейрореабилитации пациента с правосторонним гемипарезом после ишемического инсульта давностью 6 недель был дополнен пятью сессиями фМРТ-ЭЭГ-НБУ с интервалом 2–3 дня. Требовалось обучиться воображать движение правой стопой таким образом, чтобы усиливался BOLD-сигнал представительства ноги в первичной моторной коре (M1F) и дополнительной моторной области (SMA) левого полушария, а также возникала десинхронизация мю- и бета2-диапазонов ЭЭГ с Cz-отведения; стратегия формулировалась в общем виде как воображение движения паретичной конечностью. Каждая тренировочная сессия включала два прогона по 8 блоков с отдыхом 2 мин между ними (10 прогонов НБУ за курс). Каждый блок состоял из воображения движения (40 с), визуальной обратной связи (10 с) и отдыха (20 с). Обратная связь предъявлялась на мониторе пациента в виде цифровой шкалы от 0 до 100, которая на 2/3 определялась уровнем усиления BOLD-сигнала в регионах интереса (regions of interest, ROI) и на 1/3 – снижением мощности ритмов ЭЭГ в мю- и бета2-диапазонах на Cz.

Сессии НБУ реализованы в Центре коллективного пользования «Масс-спектрометрические исследования» СО РАН с использованием томографа Philips Ingenia 3,0 Тл (Philips, США). Референсное анатомическое изображение получено методом T1 TFE с размером вокселя $1 \times 1 \times 1$ мм³. Основные T2*-взвешенные изображения получены методом EPI FFE, TR/TE=2500/35 мс, размер вокселя $2 \times 2 \times 5$ мм³. ROI были функционально локализованы во время выполнения тестового прогона, который состоял из блоков движения стопой, чередующихся с отдыхом. Запись ЭЭГ производилась на 128-канальном МР-совместимом энцефалографе Brain Products BrainAmp. Сопротивление каждого электрода поддерживалось 20 кОм или менее. Дополнительный ЭКГ-электрод располагался под левой лопаткой пациента. Частота сбора ЭЭГ-данных составляла 5 кГц. Для предъяснения обратной связи вычислялось отношение мощности ритма в покое к мощности во время выполнения задачи регуляции с отведения Cz; баллами поощрялось значение >1 . Для онлайн-предобработки фМРТ-снимков и вычисления усредненного уровня сигнала из ROI в реальном времени и организации обратной связи использовалось программное обеспечение OpenNFT.

Предварительная оффлайн-обработка результатов и получение фМРТ-изображений реализовались с помощью программного комплекса Matlab и CONN (www.nitrc.org/projects/conn). Успешность формирования навыка волевого управления гемодинамическим откликом (BOLD-сигнал) в ROI и мощностью мю- и бета2-диапазонов ЭЭГ на Cz оценивалась по тенденции изменений целевых нейрофизиологических параметров от первой к пятой сессии курса НБУ. Для BOLD-сигнала вычислялся также индекс латерализации (ИЛ) по формуле: $ИЛ = (ROI_{Aff} - ROI_{Unaff}) / (ROI_{Aff} + ROI_{Unaff})$, где ROI_{Aff} и ROI_{Unaff} – активность фМРТ в пораженной и непораженной ROI соответственно. Этот расчет дает число от -1 до 1 , где положительные значения указывают на латерализацию в сторону пораженного полушария, а отрицательные – в сторону непораженного [9, 19]. Преобладание ипсилатеральной активации в ответ на движения паретичной конечностью может характеризовать дезадаптивный паттерн, ассоциированный с худшим функциональным прогнозом при инсульте [20]. Поэтому в некоторых протоколах фМРТ-НБУ для восстановления моторики после инсульта пациенты обучаются смещать ИЛ к позитивным значениям [9]. В протоколах же с участием здоровых людей способность достигать латерализации сигнала (ЭЭГ и/

или фМРТ) расценивается как компетентность (успешность) в обучении НБУ [21].

Очистка записи ЭЭГ от артефактов магнитного поля производилась методом скользящего среднего из Bergen EEG-fMRI Toolbox [22], окно усреднения $64 * TR$. QRS-комплексы ЭКГ идентифицировали с помощью Bergen EEG-fMRI Toolbox; компоненты, демонстрирующие высокую спектральную корреляцию с зарегистрированным ЭКГ-сигналом, определяли как артефактные и исключали из последующей реконструкции данных с помощью FieldTrip toolbox [23]. Окуломоторные артефакты удаляли с помощью BLINKER [24]. На последней стадии исключали компоненты, помеченные автоматическим классификатором ICLABEL EEGLAB как other, heart, eye, muscle с вероятностью $> 80\%$.

Корреляционный анализ фМРТ-ЭЭГ проводили по средним значениям каждой сессии. В качестве показателей активности по данным томографа использовали процентное изменение BOLD-сигнала (BOLD PSC) во время блоков воображения относительно блоков отдыха, в качестве показателей ЭЭГ – отношение средней мощности сигнала в мю-/бета2-диапазонах в блоках отдыха к средней мощности в блоках работы. Между этими значениями вычисляли корреляцию Спирмена, которую считали статистически значимой при $p < 0,05$.

Матрицы функциональной связности моторной сети в состоянии покоя строили с помощью программы CONN с априорным набором ROI – SMA, представительство ноги в моторной коре ($M1^F$), представительство кисти в первичной моторной коре ($M1^H$), а также мозжечок (Cer6) – билатерально.

Результаты

Очаг инсульта локализовался в медиальных отделах левой теменной доли, затрагивая моторную зону коркового представительства правой ноги, и в клинической картине преобладал парез ноги с нарушением темпа и паттерна ходьбы. К концу лечения темп ходьбы стал быстрее, шаг – равномернее и шире (табл. 1).

Подавление мощности ритма ЭЭГ на отведении Cz в мю- и в бета2-диапазоне достигалось в большинстве прогонов сессий фМРТ-ЭЭГ НБУ. Причем для мю-диапазона более успешной оказалась первая половина тренинга, для бета2-диапазона – вторая (рис. 1). По ходу курса отмечалась тенденция к увеличению средних значений PSC BOLD $M1^F$ и SMA поврежденного (левого) полушария, хотя активация этих ROI стопой была слабой: в среднем на $0,1$ и $0,4\%$ соответственно.

Гомологичные регионы неповрежденного полушария активировались сильнее: на 0,5, и 1,3 % соответственно (рис. 2). ИЛ для M1F составил в среднем -5,56; для SMA – -1,29.

Воксельный анализ всего мозга показал, что в интерактивных сессиях фМРТ-ЭЭГ-НБУ стабильно активировались (FWE <0,05) узлы моторной сети (M1H, SMA, дорзальная и вентральная премоторная кора (d/vPMC) справа (R); правый таламус (Thal_R), правое полушарие мозжечка (Cer_R)), а также узлы когнитивных церебральных сетей: передняя поясная кора (ACC) L/R, передний островок (AInsula) L/R, префронтальная кора (PFC) L/R, полюс теменной доли (Temporal_Pole) слева (L) (сеть значимости, Salience

Таблица 1. Клинические данные пациента до и после лечения

Table 1. Clinical data of the patient before and after treatment

Тест	До лечения	После лечения
MRC рука, баллы	4	4
MRC бедро, баллы	2	3
MRC стопа, баллы	1	2
Ходьба на 30 м, с/шагов	48/60	34/53

Примечание. MRC – шкала комитета медицинских исследований (Medical Research Council), где пяти баллам соответствует нормальная сила, нулю – парез.

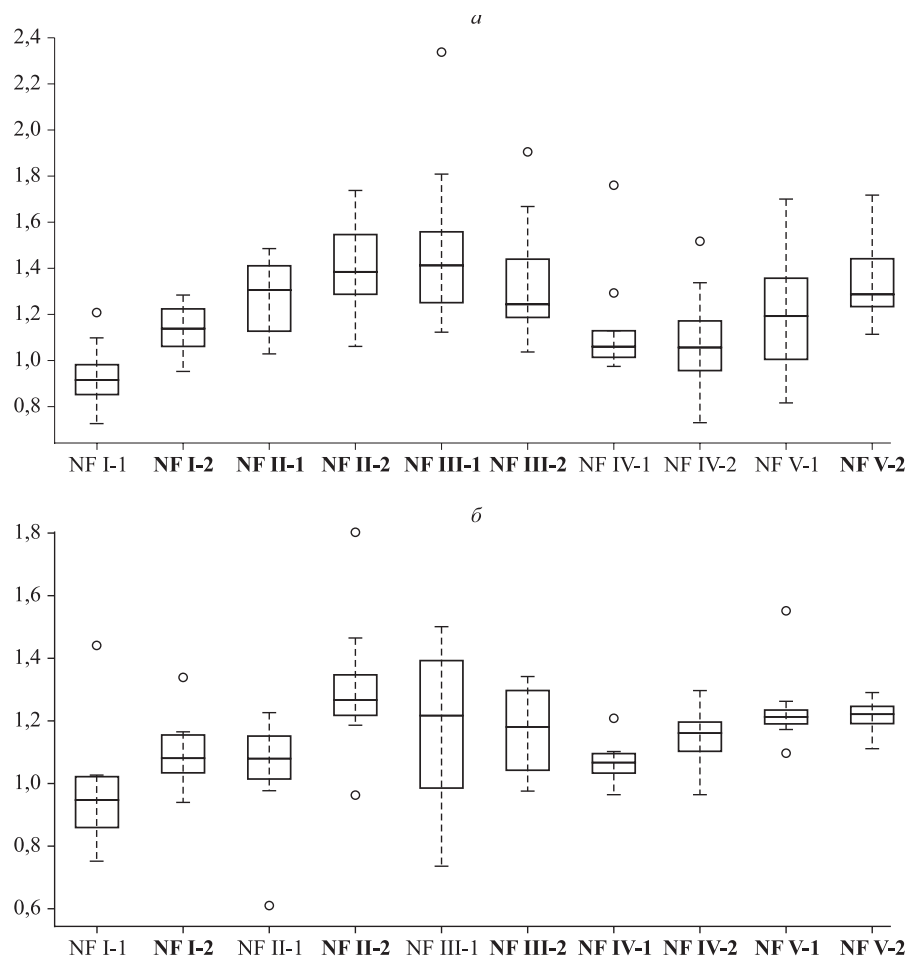


Рис. 1. Динамика навыка произвольной десинхронизации ритмов ЭЭГ в мю- (а) и бета2-диапазонах (б) в сессиях фМРТ-ЭЭГ-НБУ. По оси ординат – среднее значение отношения мощности ЭЭГ в покое к мощности во время выполнения задачи регуляции с Cz-отведения; по оси абсцисс – данные с первой по пятую сессии НБУ (NF I-V), по два прогона в каждой (индексы 1 и 2; всего 10 прогонов). Жирным выделены прогоны с «успешным» подавлением ритма ЭЭГ (среднее значение >1; $p < 0,05$)

Fig. 1. Dynamics of the voluntary control of the desynchronization of the mu (a) and beta2 bands (б) in fMRI-EEG-NF training. The ordinate axis shows the average value of the ratio of the EEG power at rest to the power during the regulation task with the Cz lead; the abscissa axis shows data from the first to the fifth NF sessions (NF I-V), two runs in each (indices 1 and 2; 10 runs in total). Runs with “successful” suppression of the EEG rhythm (average value >1; $p < 0.05$) are highlighted in bold

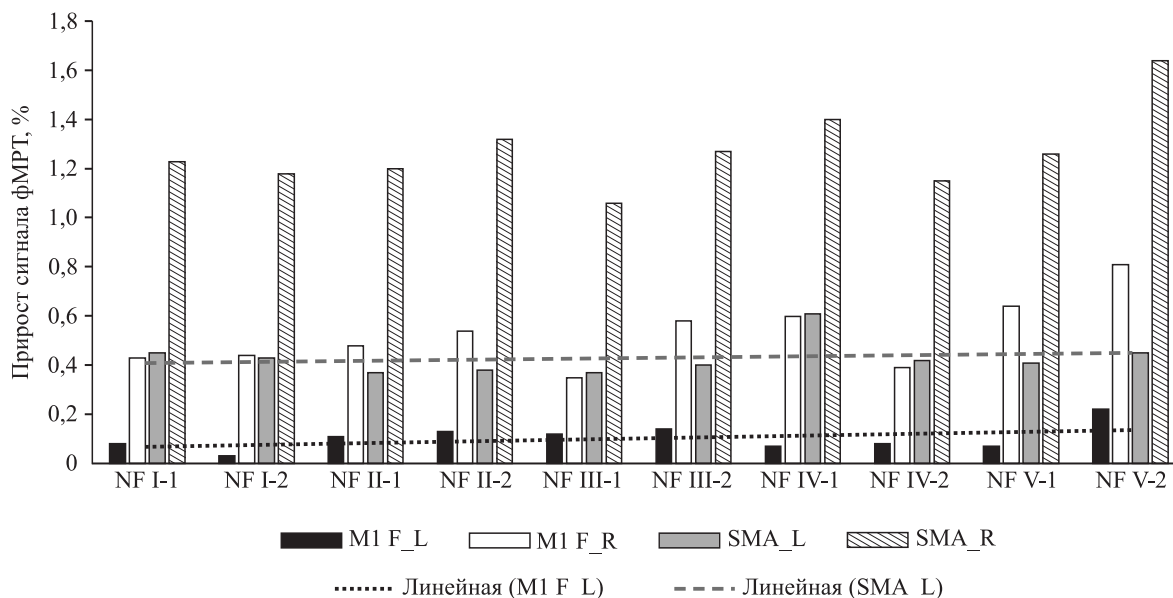


Рис. 2. Изменения BOLD-сигнала $M1^F$ ROI и гомологичных им областей интактного (правого) полушария по сессиям интерактивного тренинга воображения. По оси ординат представлена средняя величина изменения BOLD-сигнала в сессиях НБУ; по оси абсцисс – данные с первой по пятую сессии (NF I-V), по два прогона в каждой (индексы 1 и 2; всего 10 прогонов); R – правое полушарие; L – левое полушарие. Для регионов $M1^F$ и SMA поврежденного (левого) полушария построены линии тренда («линейная») и обозначены пунктиром. Данные о сигналах $M1^F$ и SMA интактного (правого) полушария иллюстрируют неспособность пациента достичь положительных значений индекса латерализации

Fig. 2. Dynamics of the BOLD fMRI activation in the $M1^F$ and SMA regions of the both hemispheres in the fMRI-EEG-NF sessions. The ordinate axis shows the average value of the BOLD signal change in the NF sessions; the abscissa axis shows the data from the first to the fifth NF sessions (NF I-V), two runs in each (indices 1 and 2; 10 runs in total); R – right hemisphere; L – left hemisphere. Trend lines are plotted for the $M1^F$ and SMA regions of the damaged (left) hemisphere («linear») and indicated by dotted lines. The intact (right) hemisphere $M1^F$ and SMA signal data illustrate the patient's inability to achieve positive lateralization index values

Network – SN), внутритеменная борозда и лобное поле глаза справа (FEF_R и IPS_R) Frontal_Inf_Oper_L/R (дорзальная сеть внимания, Dorsal Attention Network – DAN); верхняя височная извилина (STG) L/R, нижняя лобная извилина (IFG) слева (языковая сеть, Language Network), зрительная кора; активации узлов сети когнитивного контроля (Frontoparietal Network, FPN или Central Executive Network, CEN), а также дефолтной системы мозга (Default Mode Network) в заданиях на воображение с обратной связью не наблюдались (рис. 3).

Результаты вычисления корреляций изменения BOLD-сигнала и подавления ритмов ЭЭГ в сессиях НБУ обобщены в табл. 2. К концу курса сформировалась связность $M1^F$ левого полушария с ипсилатеральной SMA ($r = 0,19$) и Ceg ($r = 0,15$). Вместе с тем межполушарные связи ROI ($M1^F$ и SMA) распались. В здоровом (правом) полушарии укрепилась внутрислошарная связность $M1^F$ и SMA (рис. 4).

Обсуждение

На примере пациента с постинсультным парезом ноги представлены результаты первого пилотного исследования взаимосвязей гемодинамического (BOLD) и электромагнитного (ЭЭГ) сигналов мозга в курсе идеомоторной тренировки движений в интерактивном режиме НБУ. Отметим, что технология фМРТ-ЭЭГ-НБУ переживает сейчас свое становление, поскольку оборудование и вычислительные мощности, способные объединить и обработать два потока данных в режиме реального времени, трансформировать их в сигнал обратной связи, разработаны чуть более 10 лет назад [15, 16]. Опубликованные работы на ограниченном числе испытуемых демонстрировали по большей части осуществимость метода как такового и/или акцентировались на клиническом эффекте [25]. Нейрофизиологические фМРТ/ЭЭГ-корреляты идеомоторных тренировок у пациентов после инсульта пока не описывались.

В экспериментах с участием здоровых добровольцев показано, что эффект ЭЭГ-НБУ при воображении движения внутри томографа скажется в одинаковой степени как на сигнале ЭЭГ, так и на сигнале фМРТ, что косвенно свидетельствует о связи между сигнатурами ЭЭГ и фМРТ [21]. В нашем исследовании пациенту удалось одновременно модулировать сигнал BOLD и мощность целевых ритмов ЭЭГ; при этом латерализации сигнала M1^F и SMA в сторону поврежденного полушария он не добился (см. рис. 1, 2).

В целом значение гиперактивности интактного полушария для прогноза двигательного восстановления остается предметом дискуссий. Существуют свидетельства того, что преобладание ипсилатеральной активации, а также усиленные транскаллозальные взаимосвязи моторных областей в ответ на движения паретичной конечностью ассоциированы с худшим функциональным исходом при инсульте; для преодоления такого дисбаланса разработаны протоколы неинвазивной нейромодуляции посредством ритмической транскраниальной магнитной стимуляции [20]. С другой стороны, участие неповрежденного полушария в компенсации утраченных двигательных функций не вызывает сомнений [26]. В нашем исследовании при явной и устойчиво преобладающей активности M1^F и SMA правого полушария межполушарные связи этих областей с гомологичными узлами поврежденного полушария распались. Параллельно укрепились внутриволосарные связи M1^F и SMA в обеих гемисферах. Чтобы понять, связано ли такое преобразование моторной сети с гиперактивацией здорового полушария и какое значение оно имеет для функционального исхода после повреждения мозга, нужны дальнейшие исследования.

В многочисленных работах показано, что двигательное воображение активирует моторную систему мозга и реконструирует ее функциональные связи с узлами когнитивных сетей,

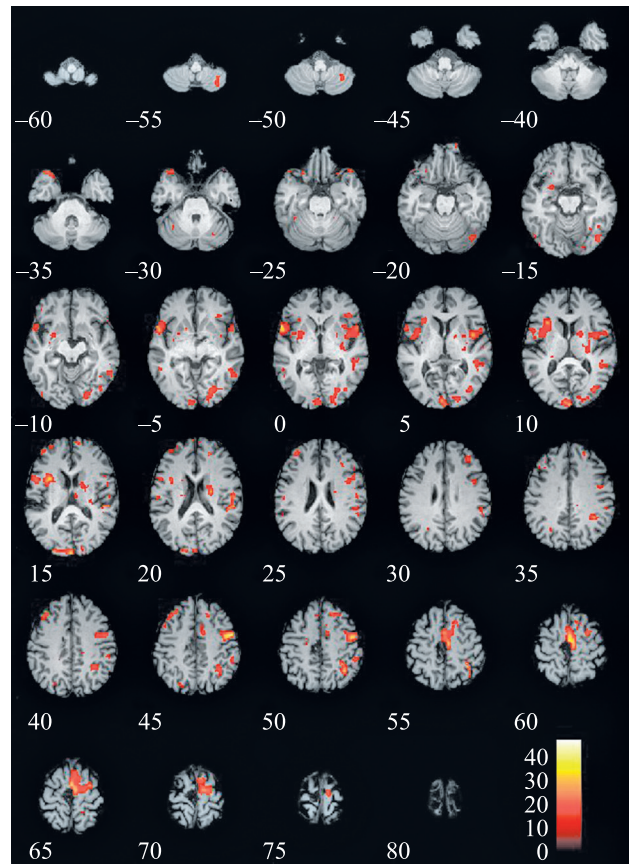


Рис. 3. Усредненная карта активации всего мозга по BOLD сигналу в сессиях фМРТ-ЭЭГ-НБУ (FWE < 0,05)

Fig. 3. Average the whole brain activation map in fMRI-EEG-NF sessions (FWE < 0.05)

способствуя тем самым эффективности двигательной нейрореабилитации [27]. В нашем примере интерактивного фМРТ-ЭЭГ-тренинга моторного воображения рекрутировались узлы сенсомоторной сети, сети значимости, дорзальной сети внимания, но не узлы сети когнитивного контроля и дефолтной системы мозга. Для заданий с идеомоторной тренировкой у здоровых

Таблица 2. Ассоциации мю- и бета2-ЭЭГ-ритмов на Cz с фМРТ-активностью

Table 2. The mu and beta2 rhythm associations with fMRI activity

Корреляция	мю-диапазон	бета2-диапазон
Прямая	PMC_L (0,67), PMC_R (0,58), M1 ^H _R (0,71), ThA_R (0,57), AI_R (0,55), M1 ^F _L (0,71)	PMC_L (0,66), PMC_R (0,75), M1 ^H _R (0,86), ThA_R (0,62), AI_R (0,57), Cer6_L (0,68)
Обратная	SMA_L (-0,64)	–

Примечание. PMC – премоторная кора; ThA_L – передний таламус; Cer6 – зона 6 в мозжечке по атласу CONN; AI – передняя островковая кора; R – справа; L – слева. В скобках приведен коэффициент корреляции; указаны регионы только со значимой корреляцией ($p < 0,05$).

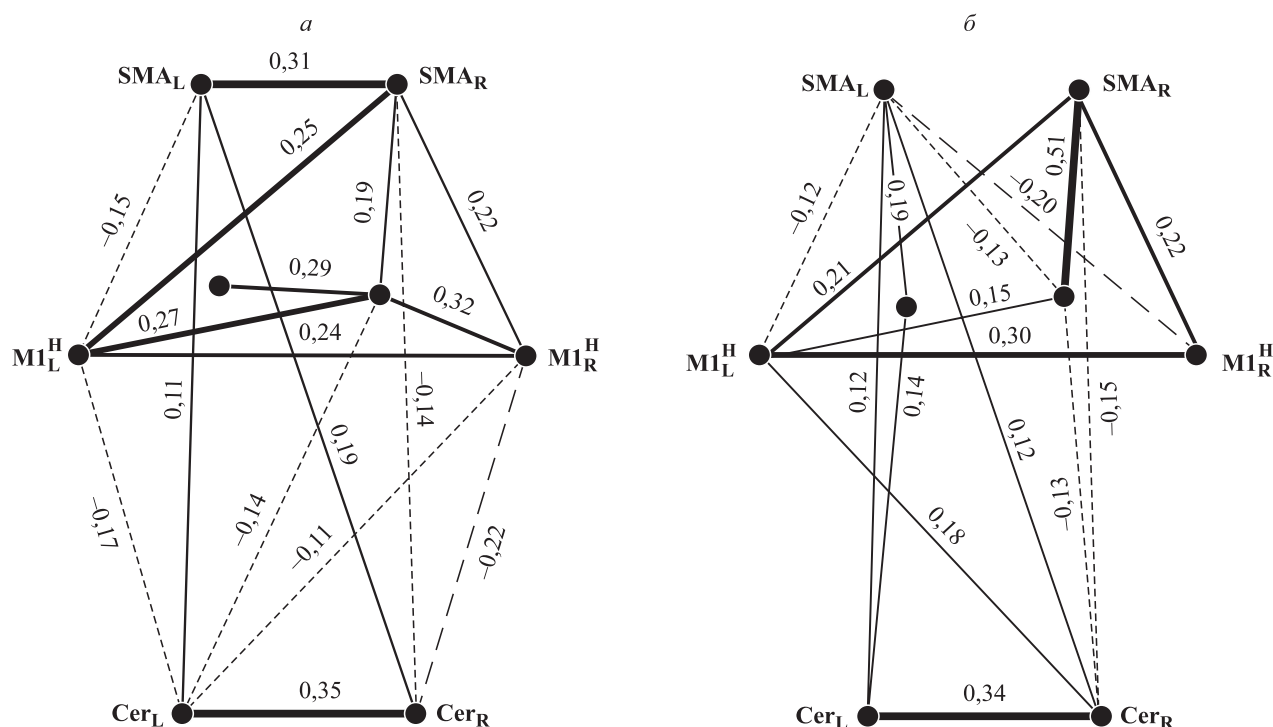


Рис. 4. Функциональная связность моторных областей по данным фМРТ покоя до (а) и после курса лечения (б). Сила функциональных связей вычислена с помощью программы CONN (цифры над линиями связностей обозначают коэффициенты корреляции). Значения, по модулю меньше 0,1, на рисунке отсутствуют. Сплошными линиями обозначены связи с положительной корреляцией, пунктирными – с отрицательной. Неподписанный узел – область моторной коры, соответствующая ноге; R – правое полушарие, L – левое полушарие

Fig. 4. Functional connectivity of motor areas based on resting state fMRI data before (a) and after treatment (б). The strength of functional connectivity was calculated using the CONN program (the numbers above the connectivity lines indicate the correlation coefficients). Values with absolute values less than 0.1 are not shown. Solid lines indicate positive correlations, dotted lines indicate negative correlations. The unlabeled node is the motor cortex area corresponding to the leg; R – right hemisphere, L – left hemisphere.

лиц описана отрицательная корреляция между амплитудой контралатерального ритма ЭЭГ и гемодинамическими сигналами фМРТ в сенсомоторных областях [21, 28]. Сообщалось также, что мощность мю-ритма отрицательно коррелировала с BOLD-сигналом из областей сети контроля внимания и положительно – с BOLD-сигналом из областей сети значимости, включая переднюю поясную кору и передний островок.

В нашем исследовании десинхронизация ЭЭГ в мю- и бета2-диапазонах была ассоциирована с активацией BOLD-сигналов узлов моторной системы (M1^H_R, PMC_L, PMC_R, ThA_R) и сети значимости (AI_R). Активация BOLD-сигналов в M1^F_L ассоциировалась с десинхронизацией в мю-, но не в бета2-диапазоне. Единственная отрицательная корреляция обнаружена между BOLD-сигналом SMA_L и степенью подавления мю-диапазона (см. табл. 2). Эти результаты в це-

лом согласуются с гипотезой о том, что сенсомоторный ритм связан с несколькими областями и системами мозга [29–31]. Однако особенности этих ассоциаций при инсульте, обусловленные его клиничко-морфологическими и другими параметрами, являются предметом будущих исследований.

Заключение

Сделана попытка проанализировать взаимные связи сигналов фМРТ и ЭЭГ, зарегистрированных и одновременно предъявленных пациенту с гемипарезом в контуре обратной связи. Мы не обнаружили тех линейных ассоциаций между двумя модальностями, о которых сообщается в исследованиях с участием здоровых испытуемых. Очевидно, что описанная здесь феноменология требует проверки и поиска закономерностей на

групповых данных. Тем не менее продемонстрирована способность пациента с инсультом произвольно модулировать электрофизиологические и гемодинамические сигналы одновременно. Осознавая, что слияние мультимодальных данных сопряжено с целым рядом технических и технологических проблем, мы полагаем, что технология фМРТ-ЭЭГ-НБУ (мы называем ее интерактивной терапией (стимуляцией) мозга) дает возможность не только раскрыть церебральные механизмы моторного (пере)обучения после повреждения мозга, но и разработать новые, персонализированные реабилитационные подходы.

Список литературы / References

1. Ишемический инсульт и транзиторная ишемическая атака: клинические рекомендации. М., 2024. 328 с.
Ischemic stroke and transient ischemic attack: clinical guidelines. Moscow, 2024. 238 p. [In Russian].
2. Evans J.R., Dellinger M.B., Russell H.L. (eds.). Neurofeedback: the first fifty years. N.Y.; Academic Press, 2019. 536 p.
3. Pfurtscheller G., Neuper C., Andrew C., Edlinger G. Foot and hand area mu rhythms. *Int. J. Psychophysiol.* 1997;26(1–3):121–135. doi: 10.1016/S0167-8760(97)00760-5
4. McFarland D.J., Miner L.A., Vaughan T.M., Wolpaw J.R. Mu and beta rhythm topographies during motor imagery and actual movements. *Brain topog.* 2000;12(3):177–186. doi: 10.1023/a:1023437823106
5. Ogawa S., Menon R.S., Kim S.G., Ugurbil K. On the characteristics of functional magnetic resonance imaging of the brain. *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 1998;27(1):447–474. doi: 10.1146/annurev.biophys.27.1.447
6. Sitaram R., Veit R., Stevens B., Caria A., Gerloff C., Birbaumer N., Hummel F. Acquired control of ventral premotor cortex activity by feedback training: an exploratory real-time fMRI and TMS study. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2012;26(3):256–265. doi: 10.1177/1545968311418345
7. Mehler D.M.A., Williams A.N., Whittaker J.R., Krause F., Lührs M., Kunas S., Wise R.G., Shetty H.G.M., Turner D.L., Linden D.E.J. Graded fmri neurofeedback training of motor imagery in middle cerebral artery stroke patients: a preregistered proof-of-concept study. *Front. Hum. Neurosci.* 2020;14:226. doi: 10.3389/fnhum.2020.00226
8. Liew S.L., Rana M., Cornelsen S., Fortunato de Barros Filho M., Birbaumer N., Sitaram R., Cohen L.G., Soekadar S.R. Improving motor corticothalamic communication after stroke using real-time fMRI connectivity-based neurofeedback. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2016;30(7):671–675. doi: 10.1177/1545968315619699
9. Sanders Z.B., Fleming M.K., Smejka T., Marzolla M.C., Zich C., Rieger S.W., Lührs M., Goebel R., Sampaio-Baptista C., Johansen-Berg H. Self-modulation of motor cortex activity after stroke: a randomized controlled trial. *Brain.* 2022;145(10):3391–3404. doi: 10.1093/brain/awac239
10. Remsik A.B., Gjini K., Williams L. Jr., van Kan P.L.E., Gloe S., Bjorklund E., Rivera C.A., Romero S., Young B.M., Nair V.A., Caldera K.E., Williams J.C., Prabhakaran V. Ipsilesional mu rhythm desynchronization correlates with improvements in affected hand grip strength and functional connectivity in sensorimotor cortices following BCI-FES intervention for upper extremity in stroke survivors. *Front. Hum. Neurosci.* 2021;15:725645. doi: 10.3389/fnhum.2021.725645
11. Хрущева Н.А., Калгин К.В., Савелов А.А., Шурунова А.В., Предтеченская Е.В., Штарк М.Б. Клинико-сетевая динамика функциональных связей моторной сети и мозжечка по данным функциональной магнитно-резонансной томографии покоя у пациентов с постинсультным гемипарезом в курсе интерактивной терапии (стимуляции) мозга. *Анналы клин. и эксперим. неврол.* 2024;18(1):33–43. doi: 10.54101/ACEN.2024.1.4
12. Khrushcheva N.A., Kalgin K.V., Savelov A.A., Shurunova A.V., Predtechenskaya E.V., Shtark M.B. Changes in clinical and network functional connectivity parameters in motor networks and cerebellum based on resting-state functional magnetic resonance imaging data in patients with post-stroke hemiparesis receiving interactive brain stimulation neurotherapy. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology.* 2024;18(1):33–43. [In Russian]. doi: 10.54101/ACEN.2024.1.4
13. Warbrick T. Simultaneous EEG-fMRI: what have we learned and what does the future hold? *Sensors.* 2022;22(6):2262. doi: 10.3390/s22062262
14. Mano M., Lécuyer A., Bannier E., Perronet L., Noorzadeh S., Barillot C. How to build a hybrid neurofeedback platform combining EEG and fMRI. *Front. Neurosci.* 2017;11:140. doi: 10.3389/fnins.2017.00140
15. Савелов А.А., Хрущева Н.А., Калгин К.В., Козлова Л.И., Безматерных Д.Д., Мельников М.Е., Мажирин К.Г., Шурунова А.В., Предтеченская Е.В., Штарк М.Б. Конструкция, место и клиническая эффективность технологии интерактивной терапии (стимуляции) мозга при цереброваскулярной патологии. *Комплекс. пробл. серд.-сосуд. забол.* 2023;12(1): 25–38. doi: 10.17802/2306-1278-2023-12-1-25-38
16. Savelov A.A., Khrushcheva N.A., Kalgin K.V., Kozlova L.I., Bezmaternykh D.D., Melnikov M.E., Mazhirina K.G., Shurunova A.V., Predtechenskaya E.V., Shtark M.B. Structure, place, and clinical efficacy of the interactive brain therapy (stimulation) technology in cerebrovascular diseases. *Kompleksnye problemy serdechno-sosudistykh zabolovaniy = Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2023;12(1):25–38. [In Russian]. doi: 10.17802/2306-1278-2023-12-1-25-38

15. Zotev V., Phillips R., Yuan H., Misaki M., Bodurka J. Self-regulation of human brain activity using simultaneous real-time fMRI and EEG neurofeedback. *NeuroImage*. 2014;85:985–995. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.04.126
16. Штарк М.Б., Веревкин Е.Г., Козлова Л.И., Мажирин К.Г., Покровский М.А., Петровский Е.Д., Савелов А.А., Старостин А.С., Ярош С.В. Синергичное фМРТ-ЭЭГ картирование головного мозга в режиме произвольного управления альфа-ритмом. *Бюл. эксперим. биол. и мед.* 2014;158(11):594–599.
Shtark M.B., Veryovkin E.G., Kozlova L.I., Mazhirina K.G., Pokrovsky M.A., Petrovsky E.D., Savelov A.A., Starostin A.S., Yarosh S.V. Synergetic fMRI-EEG brain mapping in alpha-rhythm voluntary control mode. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2015;158(5):644–649. doi: 10.1007/s10517-015-2827-7
17. Савелов А.А., Штарк М.Б., Мельников М.Е., Козлова Л.И., Безматерных Д.Д., Веревкин Е.Г., Петровский Е.Д., Покровский М.А., Циркин Г.М., Рудыч П.Д. Перспективы синхронной фМРТ-ЭЭГ-записи как основы интерактивной стимуляции мозга (на примере последствий инсульта). *Бюл. эксперим. биол. и мед.* 2018;166(9):366–369.
Savelov A.A., Shtark M.B., Mel'nikov M.Ye., Kozlova L.I., Bezmaternykh D.D., Veryovkin E.G., Petrovsky E.D., Pokrovsky M.A., Tsirkin G.M., Rudych P.D. Prospects of synchronous fMRI-EEG recording as the basis for neurofeedback (exemplified on patient with stroke sequelae). *Bull. Exp. Biol. Med.* 2019;166(3):390–393. doi: 10.1007/s10517-019-04357-8
18. Butet S., Fleury M., Duché Q., Bannier E., Lioi G., Scotto di Covella L., Lévêque-Le Bars E., Lécuyer A., Maurel P., Bonan I. EEG-fMRI neurofeedback versus motor imagery after stroke, a randomized controlled trial. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2025;22(1):67. doi: 10.1186/s12984-025-01598-9
19. Seghier M.L. Laterality index in functional MRI: methodological issues. *Magn. Reson. Imaging*. 2008;26(5):594–601. doi: 10.1016/j.mri.2007.10.010
20. Grefkes C., Ward N.S. Cortical reorganization after stroke: how much and how functional? *Neuroscientist*. 2014;20(1):56–70. doi: 10.1177/1073858413491147
21. Zich C., Debener S., Kranczioch C., Bleichner M.G., Gutberlet I., de Vos M. Real-time EEG feedback during simultaneous EEG-fMRI identifies the cortical signature of motor imagery. *NeuroImage*. 2015;114:438–447. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.04.020
22. Moosmann M., Schönfelder V.H., Specht K., Scheeringa R., Nordby H., Hugdahl K. Realignment parameter-informed artefact correction for simultaneous EEG-fMRI recordings. *NeuroImage*. 2009;45(4):1144–1150. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.01.024
23. Oostenveld R., Fries P., Maris E., Schoffelen J.M. FieldTrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Comput. Intell. Neurosci.* 2011(1):156869. doi: 10.1155/2011/156869
24. Kleifges K., Bigdely-Shamlo N., Kerick S.E., Robbins K.A. BLINKER: Automated extraction of ocular indices from EEG enabling large-scale analysis. *Front. Neurosci.* 2017;11:12. doi: 10.3389/fnins.2017.00012
25. Ciccarelli G., Federico G., Mele G., di Cecca A., Migliaccio M., Iardi C.R., Alfano V., Salvatore M., Cavaliere C. Simultaneous real-time EEG-fMRI neurofeedback: A systematic review. *Front. Hum. Neurosci.* 2023;17:1123014. doi: 10.3389/fnhum.2023.1123014
26. Buetefisch, C.M. Role of the contralesional hemisphere in post-stroke recovery of upper extremity motor function. *Front. Neurol.* 2015;6:214. doi: 10.3389/fneur.2015.00214
27. Machado T.C., Carregosa A.A., Santos M.S., Ribeiro N.M.S., Melo A. Efficacy of motor imagery additional to motor-based therapy in the recovery of motor function of the upper limb in post-stroke individuals: a systematic review. *Top Stroke Rehabil.* 2019;26(7):548–553. doi: 10.1080/10749357.2019.1627716
28. Yuan H., Liu T., Szarkowski R., Rios C., Ashe J., He B. Negative covariation between task-related responses in alpha/beta-band activity and BOLD in human sensorimotor cortex: an EEG and fMRI study of motor imagery and movements. *NeuroImage*. 2010;49(3):2596–2606. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.10.028
29. Yin S., Liu Y., Ding M. Amplitude of sensorimotor mu rhythm is correlated with BOLD from multiple brain regions: a simultaneous EEG-fMRI study. *Front. Hum. Neurosci.* 2016;10:364. doi: 10.3389/fnhum.2016.00364
30. Sitaram R., Ros T., Stoeckel L., Haller S., Scharnowski F., Lewis-Peacock J., Weiskopf N., Belfari M.L., Rana M., Oblak E., Birbaumer N., Sulzer J. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. *Nat. Rev. Neurosci.* 2017;18(2):86–100. doi:10.1038/nrn.2016.164
31. Barone J., Rossiter H. E. Understanding the role of sensorimotor beta oscillations. *Front. Syst. Neurosci.* 2021;15:655886. doi: 10.3389/fnsys.2021.655886

Сведения об авторах:

Хрущева Надежда Алексеевна, к.м.н., ORCID: 0000-0003-4657-2947, e-mail: khrunks@mail.ru

Калгин Константин Викторович, к.ф.-м.н., ORCID: 0000-0002-1873-4454, e-mail: kalginkv@gmail.com

Новиков Денис Андреевич, ORCID: 0009-0005-9455-0701, e-mail: loreinds32@gmail.com

Клебанский Денис Витальевич, ORCID: 0009-0009-9799-8412, e-mail: ritmandme@gmail.com

Савелов Андрей Александрович, к.ф.-м.н., ORCID: 0000-0002-5332-2607, e-mail: as@tomo.nsc.ru

Тулупов Андрей Александрович, д.м.н., проф., чл.-корр. РАН, ORCID: 0000-0002-1277-4113,

e-mail: taa@tomo.nsc.ru

Штарк Марк Борисович, д.б.н., проф., акад. РАН, ORCID: 0000-0002-2326-4709, e-mail: mark_shtark@mail.ru

Information about the authors:

Nadezhda A. Khrushcheva, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0003-4657-2947, e-mail: khrunks@mail.ru

Konstantin V. Kalgin, candidate of physical and mathematical sciences, ORCID: 0000-0002-1873-4454,

e-mail: kalginkv@gmail.com

Denis A. Novikov, ORCID: 0009-0005-9455-0701, e-mail: loreinds32@gmail.com

Denis V. Klebansky, ORCID: 0009-0009-9799-8412, e-mail: ritmandme@gmail.com

Andrey A. Savelov, candidate of physical and mathematical sciences, ORCID: 0000-0002-5332-2607,

e-mail: as@tomo.nsc.ru

Andrey A. Tulupov, doctor of medical sciences, professor, corresponding member of RAS,

ORCID: 0000-0002-1277-4113, e-mail: taa@tomo.nsc.ru

Mark B. Shtark, doctor of biological sciences, professor, academician of RAS, ORCID: 0000-0002-2326-4709,

e-mail: mark_shtark@mail.ru

Поступила в редакцию 01.09.2025

Принята к публикации 19.01.2026

Received 01.09.2025

Accepted 19.01.2026