

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ИЛЛЮЗИИ, ВЫЗВАННОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

О. А. Мокиенко^{1,2}✉, П. Д. Бобров^{1,3}, А. А. Соловьева¹, М. Р. Исаев^{1,3}, Я. В. Керечанин^{1,3}, В. Ю. Ратникова¹, В. А. Катайцев¹, Е. Д. Шагина¹, В. Б. Никишина¹¹ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова, Москва, Россия² Российский центр неврологии и нейронаук, Москва, Россия³ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, Москва, Россия

Нейрофизиологические механизмы иллюзии, вызванной зеркальной визуальной обратной связью, остаются недостаточно изученными, несмотря на клиническое применение зеркальной терапии при фантомном болевом синдроме и при постинсультном гемипарезе. Цель исследования — определить нейрофизиологические корреляты зеркальной иллюзии у здоровых людей методами одновременной регистрации электроэнцефалографии (ЭЭГ) и ближней инфракрасной спектроскопии (БИКС). Обследовано 30 здоровых добровольцев (12 мужчин, 18 женщин; средний возраст 24 ± 8 лет). Экспериментальная процедура включала три блока: бимануальное движение без зеркала, движение одной рукой с зеркалом; тактильная стимуляция с зеркалом. Анализировали степень десинхронизации ЭЭГ-ритмов альфа-диапазона (8–13 Гц) в первичных сенсомоторных областях, дополнительной моторной области и задней теменной коре, а также методом БИКС, изменение концентрации окси- и дезоксигемоглобина (HbO и HbR). При движении рукой с зеркалом происходила билатеральная активация первичных сенсомоторных областей обоих полушарий: десинхронизация мю-ритма 9,71 [2,82; 16,20]%, в контралатеральном и 5,64 [2,84; 12,13] в ипсилатеральном полушарии ($p = 0,797$), а также увеличение концентрации HbO на 6,88 [3,07; 17,20] нмоль/л в контралатеральном и на 4,91 [0,11; 14,59] нмоль/л в ипсилатеральном полушарии ($p = 0,094$). Корреляции между ЭЭГ и БИКС-показателями выявлены лишь в задней теменной коре ($r_s = 0,527$, $p = 0,003$). Субъективные характеристики иллюзии коррелировали с эмоциональной реакцией, и лишь отдельные из них слабо коррелировали с нейрофизиологическими показателями. ЭЭГ и БИКС дополняют, но не заменяют друг друга при изучении зеркальной иллюзии, формирование которой обусловлено многоуровневой сетевой организацией мозговых процессов.

Ключевые слова: зеркальная иллюзия, зеркальная визуальная обратная связь, электроэнцефалография, ближняя инфракрасная спектроскопия, кора головного мозга, нейрофизиологические маркеры

Финансирование: работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации № 125022602910-2.

Благодарности: авторы признательны участникам исследования за их вклад в развитие научного знания.

Вклад авторов: О. А. Мокиенко — дизайн исследования, анализ результатов, написание статьи; П. Д. Бобров — анализ данных, написание статьи; А. А. Соловьева — проведение экспериментов, анализ результатов; М. Р. Исаев, Я. В. Керечанин — анализ данных; В. Ю. Ратникова, В. А. Катайцев — проведение экспериментов; Е. Д. Шагина — дизайн исследования, обсуждение результатов; В. Б. Никишина — концептуализация исследования, обсуждение результатов.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом Института клинической психологии и социальной работы РНИМУ им. Н. И. Пирогова (протокол № 28 от 23 октября 2024 г.). Все участники подписали добровольное согласие на участие в исследовании.

✉ **Для корреспонденции:** Олеся Александровна Мокиенко
ул. Островитянова, д. 1, с. 1, г. Москва, 117997, Россия; o.mokienko@ihna.ru

Статья получена: 29.09.2025 **Статья принята к печати:** 16.10.2025 **Опубликована онлайн:** 28.10.2025

DOI: 10.24075/vrgmu.2025.052

Авторские права: © 2025 принадлежат авторам. **Лицензиат:** РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

NEUROPHYSIOLOGICAL MARKERS OF THE ILLUSION CAUSED BY THE MIRROR VISUAL FEEDBACK

Mokienko OA^{1,2}✉, Bobrov PD^{1,3}, Soloveva AA¹, Isaev MR^{1,3}, Kerechanin YaV^{1,3}, Ratnikova VYu¹, Kataitsev VA¹, Shagina ED¹, Nikishina VB¹¹ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia² Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia³ Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Neurophysiological mechanisms underlying the illusion caused by the mirror visual feedback are still poorly understood, despite the clinical use of mirror therapy for phantom pain and post-stroke hemiparesis. The study aimed to determine the mirror illusion neurophysiological correlates by the simultaneous use of electroencephalography (EEG) recording and near-infrared spectroscopy (NIRS). A total of 30 healthy volunteers (12 males, 18 females; average age 24 ± 8 years) were assessed. The experimental procedure consisted of three blocks: bimanual movement without a mirror; moving one hand with the mirror; tactile stimulation with the mirror. We analyzed the degree of EEG alpha rhythm (8–13 Hz) desynchronization in primary sensorimotor areas, supplementary motor area, and the posterior parietal cortex. Furthermore, changes in the concentrations of oxy- and deoxyhemoglobin (HbO and HbR) were assessed by NIRS. When moving the hand with the mirror, bilateral activation of primary sensorimotor areas occurred in both hemispheres: mu rhythm desynchronization, 9.71 [2.82; 16.20]% in the contralateral and 5.64 [2.84; 12.13]% in the ipsilateral hemispheres ($p = 0.797$), along with the HbO concentration increase by 6.88 [3.07; 17.20] nmol/L in the contralateral and by 4.91 [0.11; 14.59] nmol/L in the ipsilateral hemispheres ($p = 0.094$). The correlations between EEG and NIRS parameters were reported for the posterior parietal cortex only ($r_s = 0.527$, $p = 0.003$). The illusion subjective characteristics were correlated to the emotional response, and only some of those showed a weak correlation with neurophysiological indicators. EEG and NIRS are complementary, rather than mutually exclusive, when used to study the mirror illusion resulting from the multi-level network organization of brain processes.

Keywords: mirror illusion, mirror visual feedback, electroencephalography, near-infrared spectroscopy, cerebral cortex, neurophysiological markers

Funding: the study was conducted under the State Assignment of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (No. 125022602910-2).

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the study participants for their contribution to the scientific knowledge development.

Author contribution: Mokienko OA — research design, analysis of the results, manuscript writing; Bobrov PD — data analysis, manuscript writing; Soloveva AA — experimental procedure, analysis of the results; Isaev MR, Kerechanin YaV — data analysis; Ratnikova VYu, Kataitsev VA — experimental procedure; Shagina ED — research design, discussion; Nikishina VB — research conceptualization, discussion.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Institute of Clinical Psychology and Social Work, Pirogov Russian National Research Medical University (protocol No. 28 dated 23 October 2024). All subjects signed the informed consent to take part in the study.

✉ **Correspondence should be addressed:** Olesya A. Mokienko
Ostrovityanova, 1, stroenie 1, Moscow, 117997, Russia; o.mokienko@ihna.ru

Received: 29.09.2025 **Accepted:** 16.10.2025 **Published online:** 28.10.2025

DOI: 10.24075/brsmu.2025.052

Copyright: © 2025 by the authors. **Licensee:** Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Иллюзия, вызванная зеркальной визуальной обратной связью, или зеркальная иллюзия (ЗИ), представляет собой нейрофизиологический феномен, при котором визуальное восприятие движений отраженной в зеркале конечности создает ощущение соответствующих движений в контралатеральной конечности, расположенной за зеркалом или отсутствующей [1, 2].

Показано, что зеркальная визуальная обратная связь активирует систему зеркальных нейронов и двигательные структуры головного мозга в ипсилатеральном по отношению к активной руке полушарии, стимулируя процессы нейропластичности [2, 3], а также способствует восстановлению межполушарного функционального баланса [4, 5]. Эти физиологические механизмы послужили обоснованием зеркальной терапии — терапевтического применения ЗИ при ряде хронических неврологических патологий. Клиническая эффективность зеркальной терапии установлена при постампутационном фантомном болевом синдроме [1, 6, 7] и постинсультном гемипарезе [8–10]. Есть данные об эффективности метода при комплексном региональном болевом синдроме [11–14] и функциональных двигательных расстройствах [15]. В настоящее время идет поиск новых протоколов зеркальной терапии, направленных на повышение ее эффективности, включая такой подход, как поэтапное представление движения (Graded Motor Imagery) [16].

Электрофизиологические показатели активности головного мозга, сопровождающей ЗИ, были изучены у здоровых лиц и пациентов с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) [5, 17, 18], транскраниальной магнитной стимуляции [19, 20] и магнитной энцефалографии [21, 22], а показатели гемодинамической активности — с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии [4, 23] и ближней инфракрасной спектроскопии (БИКС) [24, 25]. Однако не описано исследований, в которых электрофизиологические и гемодинамические показатели регистрировались совместно. Мы ожидаем, что одновременная регистрация ЭЭГ и БИКС позволит лучше изучить физиологию ЗИ и сравнить информативность двух методов в отношении выявления ее коррелятов. Кроме того, нейрофизиология ЗИ при сенсорной стимуляции остается практически неизученной областью.

Цель настоящего исследования — определить нейрофизиологические корреляты ЗИ у здоровых людей с помощью одновременной регистрации активности головного мозга методами ЭЭГ и БИКС во время зеркальной процедуры с совершением движений и тактильной стимуляцией.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Участники исследования

Исследование проводили на базе ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н. И. Пирогова Минздрава России. Критерии включения: наличие подписанного добровольного информированного согласия; возраст 18–80 лет; любой пол; праворукость по Эдинбургскому опроснику мануальной асимметрии (балл выше 40). Критерии исключения: несогласие принять участие в исследовании; прием на момент исследования лекарственных препаратов, воздействующих на центральную нервную систему; наличие острых заболеваний или обострения хронических; наличие хронического болевого синдрома и инвалидизирующих состояний (в т. ч. ампутаций); наличие серьезных проблем со

зрением, препятствующих увидеть отражение конечности в зеркале; наличие заболеваний кожных покровов в области головы, добровольное желание выйти из исследования; ухудшение самочувствия в процессе исследования.

В исследование было включено 30 здоровых добровольцев, 12 мужчин и 18 женщин, медиана возраста 21 [20,0; 23,0] лет, все правши. Все участники завершили исследование, данные представлены по всей выборке ($n = 30$).

Процедура исследования

Участники исследования методом жребия были распределены в одну из двух групп: с активной правой или активной левой рукой. Активной считали руку, которая размещалась перед зеркалом и в процессе эксперимента двигалась либо подвергалась сенсорным воздействиям (рис. 1А). В группу с активной левой рукой попало 18 человек, с активной правой рукой — 12 человек.

Экспериментальные процедуры проводили в электрически экранированной и звукоизолированной камере (ООО «Нейроиконика Ассистив», Россия, модель ЭК-1). В процессе эксперимента участнику на голову надевали шапочку, на которой были установлены 21 ЭЭГ-электрод, 10 источников и 10 детекторов БИКС. Под каждый ЭЭГ-электрод был нанесен проводящий гель. Процедура исследования состояла из трех блоков: 1) синхронное движение двух рук без зеркала; 2) имитация зеркальной терапии с двигательной парадигмой; 3) имитация зеркальной терапии с сенсорной стимуляцией. После второго и третьего блоков эксперимента участнику предлагалось заполнить опросник для оценки субъективных характеристик ЗИ.

В ходе первого блока эксперимента участник выполнял бимануальное синхронное движение «кулак-ребро-ладонь» (рис. 1Б) 20 раз по звуковому сигналу с 10-секундными интервалами.

Во втором блоке перед участником исследования устанавливали зеркало так, чтобы в нем отражалась активная рука, при этом вторая рука находилась за зеркалом в расслабленном состоянии. Участник эксперимента выполнял движения «кулак-ребро-ладонь» только активной рукой 20 раз с 10-секундными

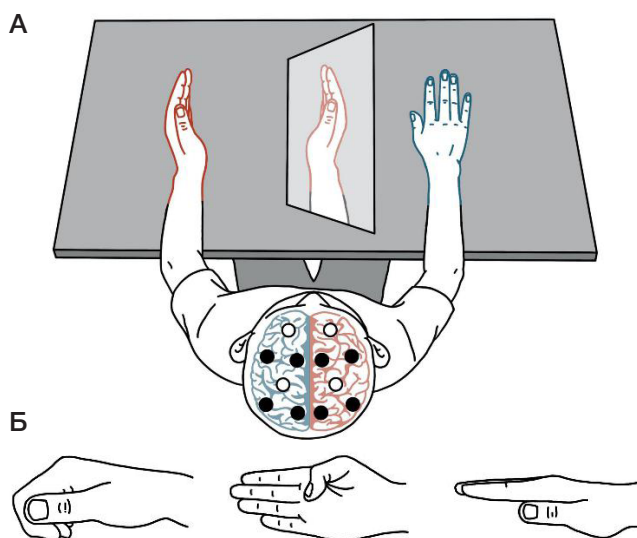


Рис. 1. А. Схема экспериментальной установки: расположение участника, зеркала и рук во время второго и третьего блоков эксперимента. Б. Движения «кулак-ребро-ладонь»

интервалами по звуковому сигналу, фокусируя взгляд на отражении движущейся руки в зеркале.

В третьем блоке исследователь проводил сенсорную стимуляцию активной руки участника. Стимуляцию тупой иглой осуществляли от середины предплечья до кончика среднего пальца, стимуляцию кистью — путем касания середины предплечья и проведения кисти до кончика среднего пальца без отрыва от руки. Интенсивность стимуляции тупой иглой была предварительно откалибрована экспериментатором и установлена на уровне, обеспечивающем комфортное тактильное ощущение без болевых или дискомфортных проявлений. Каждое воздействие включало последовательную стимуляцию сначала иглой, затем сразу же кистью, всего 20 раз. Между воздействиями делали 10-секундный перерыв. Вторая рука находилась за зеркалом в расслабленном состоянии, в то время как участник наблюдал в зеркале за отражением стимулируемой конечности.

Далее термины «контралатерально» и «ипсилатерально» при обозначении латерализации источников активности в головном мозге использованы по отношению к активной руке. На этапе бимануального движения активной условно обозначена рука, которая выполняет движения во втором и третьем блоках эксперимента.

Оценка субъективных характеристик зеркальной иллюзии

После второго и третьего блоков участники оценивали ЗИ по 10-балльной шкале по следующим параметрам:

- яркость иллюзии: «У меня возникло ощущение движения в отражаемой в зеркале руке» (второй блок) или «У меня возникли ощущения прикосновения в отражаемой руке» (третий блок);
- принадлежность: «Я чувствовал, что рука в зеркале — часть моего тела, а не просто отражение другой руки» (второй и третий блоки);

– агентность: «Мне казалось, что я могу напрямую контролировать движения руки в зеркале» (второй блок).

Дополнительно участники указывали скорость наступления ЗИ: сразу или в первые секунды стимуляции, в первой, второй, третьей или четвертой четверти процедуры.

После завершения трех блоков эксперимента участники оценивали интенсивность эмоциональной реакции, связанной с ЗИ, по пяти категориям: удивление, интерес, восторг, тревога и спокойствие (отсутствие выраженной эмоциональной реакции). Участникам предлагалось оценить выраженность каждой эмоции от 0 (полностью отсутствует) до 10 (максимальная интенсивность).

Опросник был разработан специально для данного исследования.

Регистрация сигналов активности головного мозга

ЭЭГ регистрировали при помощи прибора NeoRec Cap 21 («Медицинские компьютерные системы», Россия). Использовали 21 отведение: Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, C7, C8, P7, P8, Cp5, Cp6, Fz, Cz, Pz. В качестве референта использовали отведение Afz. Частота дискретизации: 250 Гц. Фильтрацию сигнала при регистрации не производили. ЭЭГ-записи были получены для всех 30 участников эксперимента, по одной записи на каждый блок.

Для регистрации метаболической активности мозга использовали спектрометр ближнего инфракрасного диапазона Photon Cap C20 (CortiVision, Польша) с 10 источниками и 10 детекторами. Из всех пар источник-детектор были выбраны 28 каналов, соответствовавших позициям C5h, Fcc3, Ccp3, C3h, Ccp1, Fcc1, C1h, Fccz, Fc1h, Ccpz, C2h, Ccp2, Cp2h, Fcc2, C4h, Fcc4, Ccp4, C6h, Cp1h, Cppz, P1h, P2h, Ppoz, Fc2h, Ffcz, F2h, F1h, Affz системы 10–5 (рис. 2). Частота дискретизации БИКС составляла около 5 Гц и приводилась к 5 Гц при помощи линейной интерполяции сигнала на основе временных

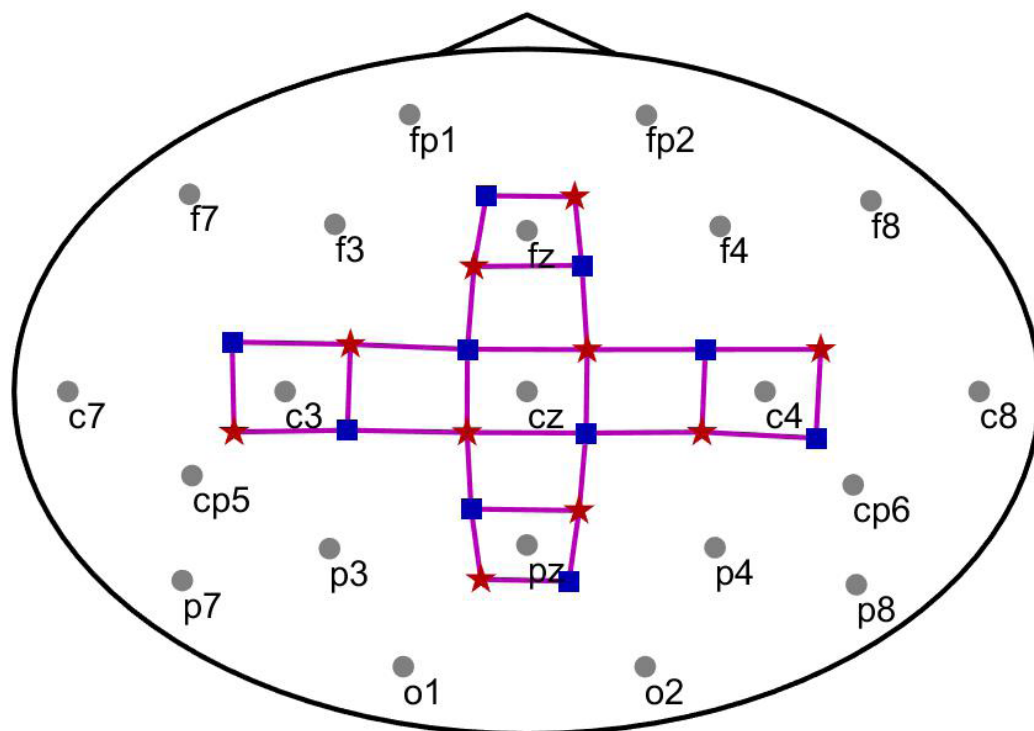


Рис. 2. Схема расположения сенсоров. Кружками обозначены ЭЭГ-электроды, прямоугольниками — оптоды — детекторы БИКС, звездочками — оптоды — источники БИКС; соединительные линии отображают пары источник-детектор, формирующие каналы БИКС

меток, посылаемых прибором. БИКС-записи были получены для 29 участников эксперимента, у одного участника запись БИКС не сохранилась.

Оба устройства передавали данные по протоколу Lab Streaming Layer при помощи ПО, предоставленного изготовителями. Для ЭЭГ это NeoRec (версия 1.6.19830, «Медицинские компьютерные системы», Россия), а для БИКС — CortiView (v1.11.5, CortiVision, Польша). Синхронизацию и запись данных осуществляли при помощи собственного скрипта в PsychoPy (v2022.1.1, Open Science Tools Ltd, Великобритания).

Регистрация движений руки или сенсорного воздействия

Движения рук участника и действия экспериментатора регистрировали видеокамерой (CBR, Китай), модель CW 870FHD, разрешение: 640 × 480, гор. FOV: 75°, частота: 10 fps. Скрипт, использовавшийся для синхронной записи БИКС и ЭЭГ, приписывал сохраняемым отсчетам номер текущего кадра. Видеозаписи анализировали покадрово. Для блоков с бимануальными движениями или движениями руки с зеркалом отмечали следующие этапы: начало движения, полное сжатие в кулак, полное раскрытие ладони, касание стола ладонью, полное прекращение движений. Для блоков со стимуляцией — начало движения руки экспериментатора, первое прикосновение твердым предметом, окончание последнего прикосновения твердым предметом, начало касания кисточкой, отрыв кисточки от руки, завершение движения руки экспериментатора. На основании выбранных кадров были размечены записи ЭЭГ и БИКС: в качестве начала события брали первый отсчет данных, соответствующий отмеченному кадру.

Обработка сигналов активности головного мозга

Данные ЭЭГ и БИКС обрабатывали в среде MATLAB 2023b. Для фильтрации ЭЭГ применяли двунаправленный режекторный фильтр, подавляющий наводку 50 Гц, а затем однонаправленный КИХ-фильтр с полосой пропускания 0,5–40 Гц. Задержка полосной фильтрации компенсировалась сдвигом отсчетов. Для выделения артефактов анализировали 200 мс эпохи сигнала. Если на каком-либо из каналов доля отсчетов, выходящих за пределы ± 200 микровольт, превышала 1%, то эпоха отбрасывалась. Только в 3 из 60 записях доля таких эпох составила 0,5–0,8%, для остальных она была значительно меньше. Записи каждого участника объединяли после фильтрации, затем проводили разложение полученного сигнала на независимые компоненты при помощи собственной реализации алгоритма AMICA [26]. На основании критериев, описанных ранее [27], были выбраны компоненты, отражающие активность в первичной сенсомоторной коре левого и правого полушарий (источники мю-ритма), дополнительной моторной области и в задней теменной коре/предклинье. Если компоненты указанного типа не удавалось идентифицировать, то для поиска их активности применяли метод формирования луча (LCMV beamforming) на основе усредненных топографических карт компонент данного типа.

Для выбранных компонент вычисляли степень десинхронизации ритмической активности в альфа-диапазоне (8–13 Гц) при совершении движений и стимуляции. Для этого применяли фильтрацию при помощи однонаправленного КИХ-фильтра с компенсацией сдвига

с последующим преобразованием Гильберта и вычислением абсолютных значений. Степень десинхронизации вычисляли как:

$$ERD = (A_{rest} - A_{task}) / (A_{rest} + A_{task}),$$

где A_{rest} — средняя амплитуда в окне (–6, –2) с перед началом движения для двигательных проб и перед началом движения руки экспериментатора для проб со стимуляцией, A_{task} — средняя амплитуда сигнала на отрезке от начала движения до его окончания для блоков с движениями или на отрезке от первого до последнего прикосновения твердым или мягким предметом для блоков со стимуляцией.

Сигналы БИКС в виде зарегистрированных интенсивностей излучения на двух длинах волн пересчитывали в концентрации окси- (HbO) и дезоксигемоглобина (HbR). К полученным данным применяли фильтр с полосой пропускания 0,002–0,09 Гц. Из каждой сессии выделяли 10-секундные отрезки с гемодинамическими откликами. Для отрезков с бимануальными движениями или движениями руки с зеркалом началом считали начало движения, для блоков со стимуляцией — первое прикосновение твердым предметом. Из каждого отрезка вычитали среднее значение сигнала за предстоящие отрезку 5 с записи. Величину гемодинамического ответа рассчитывали, как усредненное по всем отрезкам и по четырем каналам БИКС данной области значение отклика. Рассматривали четыре области, соответствующие первичной сенсомоторной коре левого (каналы БИКС в условных позициях C5h, Fcc3, Ccp3, C3h) и правого полушарий (C4h, Fcc4, Ccp4, C6h), источникам в дополнительной моторной области (Ffcz, F2h, F1h, Affz) и в задней теменной коре/предклинье (Cpzp, P1h, P2h, Ppoz).

Статистический анализ

Статистический анализ проводили в программе STATISTICA 6.0 (StatSoft, США). Для проверки гипотезы о нормальности распределения выборки использовали тест Шапиро–Уилка. Для корреляционного анализа использовали коэффициент корреляции Спирмена (rs), для сравнения связанных выборок — критерий Уилкоксона. Критический уровень значимости был установлен на уровне $p < 0,05$. Количественные данные представлены в виде медианы и межквартильного размаха (25-й и 75-й процентиля).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Степень десинхронизации мю-ритма

Из рассматриваемых источников латеральность по данным ЭЭГ удалось определить только для источников мю-ритма, т. е. тех, которые локализованы в первичных сенсомоторных областях. При бимануальном движении наблюдали сопоставимую степень десинхронизации мю-ритма над обоими полушариями. Аналогичную симметричную десинхронизацию мю-ритма регистрировали при движении одной рукой перед зеркалом на фоне неактивного состояния второй руки — как над контралатеральным, так и над ипсилатеральным полушарием относительно активной конечности (табл. 1). В отличие от этих условий, сенсорная стимуляция активной руки вызывала значимо более выраженную десинхронизацию мю-ритма над контралатеральным полушарием (табл. 1).

Таблица 1. Степень подавления мио-ритма при разных состояниях

Состояние	Контралатерально, %	Ипсилатерально, %	<i>p</i>
Бимануальное движение	10,89 [4,59; 18,12]	8,72 [3,71; 16,02]	0,544
Движение одной рукой (активной)	9,71 [2,82; 16,20]	5,64 [2,84; 12,13]	0,797
Тактильная стимуляция	14,57 [6,39; 20,17]	5,49 [-5,00; 8,46]	< 0,001

Таблица 2. Величина гемодинамического ответа при разных состояниях

Состояние	HbO, нмоль/л			HbR, нмоль/л		
	Контралатерально	Ипсилатерально	<i>p</i>	Контралатерально	Ипсилатерально	<i>p</i>
Бимануальное движение	6,92 [-0,21; 28,04]	7,02 [0,36; 28,61]	0,393	-2,66 [-7,80; -0,63]	-2,48 [-5,69; -0,13]	0,393
Движение одной рукой	6,88 [3,07; 17,20]	4,91 [0,11; 14,59]	0,094	-0,68 [-4,32; 0,86]	-0,52 [-2,73; 0,80]	0,905
Тактильная стимуляция	-0,76 [-16,59; 2,30]	-0,45 [-15,53; 6,18]	0,77	-0,09 [-1,02; 2,37]	0,27 [-1,19; 2,10]	0,787

Гемодинамический отклик

Во всех экспериментальных блоках регистрировалась сопоставимая выраженность гемодинамического ответа в обоих полушариях головного мозга (табл. 2). Данная закономерность проявлялась в отношении концентрации как HbO, так и HbR. При тактильной стимуляции возникали атипичные изменения гемодинамических показателей: концентрация HbO в период активной стимуляции снижалась, тогда как концентрация HbR снижалась в меньшей степени или повышалась (табл. 2).

Корреляция количественных характеристик ЭЭГ- и БИКС-сигналов

Выраженность десинхронизации ритмической активности в альфа-диапазоне также коррелировала с изменением концентрации HbO ($r_s = 0,527$, $p = 0,003$) во время движения одной рукой перед зеркалом в области задней теменной коры. Других статистически значимых корреляций между степенью десинхронизации и показателями гемодинамического ответа для одинаковых экспериментальных состояний выявлено не было.

Психометрические характеристики зеркальной иллюзии

Степень субъективной выраженности ЗИ была сопоставима при движении рукой и сенсорной стимуляции по таким характеристикам, как яркость иллюзии и чувство принадлежности (табл. 3). Большинство участников отметили наступление ЗИ в течение первой половины соответствующего блока: 53% во втором блоке и 79% в третьем блоке (табл. 3).

Анализ корреляций между субъективными характеристиками ЗИ и степенью десинхронизации либо изменением концентрации HbO или HbR при движении одной рукой перед зеркалом позволил выявить только слабую корреляцию яркости иллюзии со степенью десинхронизации ипсилатерального мио-ритма ($r_s = 0,370$, $p = 0,044$) и изменением концентрации HbO в области дополнительной моторной коры ($r_s = 0,425$, $p = 0,022$), а также слабую корреляцию чувства владения виртуальной конечностью с изменением концентрации HbO ($r_s = 0,392$, $p = 0,036$) и HbR ($r_s = -0,413$, $p = 0,026$) в области дополнительной моторной коры. Других статистически значимых корреляций для этого задания не обнаружено.

Таблица 3. Субъективные характеристики зеркальной иллюзий при одностороннем движении или сенсорной стимуляции перед зеркалом

Характеристика иллюзии		Состояние		
		Движение рукой	Сенсорная стимуляция	<i>p</i>
Яркость иллюзии, 0–10 баллов		4,5 [1,0; 7,0]	2,0 [0,0; 6,0]	0,23
Принадлежность, 0–10 баллов		6,0 [3,0; 8,0]	4,0 [3,0; 8,0]	0,192
Агентность, 0–10 баллов		4,5 [2,0; 7,0]	–	–
Скорость наступления, человек*	Сразу	8	9	–
	Первая четверть	5	5	
	Вторая четверть	3	9	
	Третья четверть	6	3	
	Четвертая четверть	3	1	
	Не наступила	5	2	
Эмоциональная реакция, 0–10 баллов	Удивление	6,0 [3,0; 7,0]		–
	Интерес	8,0 [6,0; 8,0]		
	Восторг	3,0 [1,0; 7,0]		
	Тревога	1,0 [0,0; 5,0]		
	Спокойствие	7,5 [4,0; 9,0]		

Примечание: * — в одной анкете не была отмечена скорость наступления иллюзии в блоке с сенсорной стимуляцией.

Таблица 4. Субъективные характеристики зеркальной иллюзии при одностороннем движении или сенсорной стимуляции перед зеркалом

Характеристика иллюзии	Эмоциональная реакция				
	Удивление	Интерес	Восторг	Тревога	Спокойствие
Яркость иллюзии – движение рукой	$r_s = 0,523$ $p = 0,003$	$r_s = 0,378$ $p = 0,039$	$r_s = 0,469$ $p = 0,008$	$r_s = 0,404$ $p = 0,027$	$r_s = -0,199$ $p = 0,291$
Принадлежность – движение рукой	$r_s = 0,568$ $p = 0,001$	$r_s = 0,482$ $p = 0,007$	$r_s = 0,551$ $p = 0,002$	$r_s = 0,401$ $p = 0,028$	$r_s = -0,305$ $p = 0,101$
Агентность – движение рукой	$r_s = 0,626$ $p < 0,001$	$r_s = 0,502$ $p = 0,005$	$r_s = 0,588$ $p < 0,001$	$r_s = 0,391$ $p = 0,032$	$r_s = -0,305$ $p = 0,101$
Яркость иллюзии – сенсорная стимуляция	$r_s = 0,227$ $p = 0,226$	$r_s = 0,231$ $p = 0,217$	$r_s = 0,303$ $p = 0,104$	$r_s = -0,108$ $p = 0,570$	$r_s = 0,268$ $p = 0,152$
Принадлежность – сенсорная стимуляция	$r_s = 0,487$ $p = 0,006$	$r_s = 0,410$ $p = 0,025$	$r_s = 0,499$ $p = 0,005$	$r_s = 0,401$ $p = 0,028$	$r_s = -0,173$ $p = 0,358$

При сенсорной стимуляции руки, расположенной перед зеркалом, статистически значимых корреляций между субъективными характеристиками ЗИ и степенью десинхронизации мио-ритма (как контра-, так и ипсилатерально) не выявлено.

Большинство субъективных характеристик ЗИ достоверно положительно коррелировало с выраженностью эмоциональной реакции на данную иллюзию (табл. 4).

Выраженность интереса к возникающим иллюзорным ощущениям отрицательно коррелировала со степенью десинхронизации мио-ритма в контралатеральном полушарии ($r_s = -0,471, p = 0,009$) и в области дополнительной моторной коры ($r_s = -0,419, p = 0,021$), а также с изменением концентрации HbO в области дополнительной моторной коры ($r_s = -0,444, p = 0,016$) во время движения рукой перед зеркалом. Других статистически значимых корреляций между выраженностью эмоциональных реакций и количественными показателями ЭЭГ- или БИКС-ответа не выявлено.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном исследовании при совместной регистрации ЭЭГ и БИКС-сигналов головного мозга во время предъявления зеркальной визуальной обратной связи здоровым добровольцам было продемонстрировано, что при движении одной рукой с зеркалом активируются оба полушария головного мозга, аналогично бимануальному движению, что можно оценить как по электрофизиологическим, так и по гемодинамическим показателям. При тактильной стимуляции методом ЭЭГ была зарегистрирована активация только контралатерального полушария относительно стимулируемой конечности, тогда как методом БИКС — сопоставимые изменения гемодинамики в обоих полушариях, однако атипичные в отношении направления изменения концентраций HbO и HbR. Большинство показателей электрофизиологического и гемодинамического ответа не коррелировало между собой.

В других работах билатеральная активация головного мозга при выполнении движения с визуальной зеркальной обратной связью была показана с помощью ЭЭГ [17, 18] и с помощью БИКС [24, 25] по отдельности. Движение одной рукой перед зеркалом сопровождалось в большей степени активацией дополнительной моторной [24, 25], верхней или нижней теменной [18, 24], премоторной [18, 25] и первичной соматомоторной [18] коры ипсилатерального по отношению к активной руке полушария. Указанные области включают структуры системы зеркальных нейронов, но ими не ограничиваются. Одно из объяснений механизма

возникновения ЗИ — блокада тормозных процессов в ипсилатеральных (т. е. контралатеральных зеркальному отображению) фронтальных и теменных ассоциативных сенсомоторных областях коры, приводящая к растормаживанию указанных областей и развитию иллюзии движения неподвижной конечности за зеркалом [18]. Возможно, это происходит вследствие индуцированного зеркальной обратной связью сдвига активации корковых структур в направлении ипсилатерального полушария, что способствует снижению межполушарного дисбаланса при одностороннем движении [5].

При изучении изменения ЭЭГ при тактильной стимуляции с зеркалом [28] была показана более сильная активация на стороне, контралатеральной стимулируемой руке, с чем согласуются и наши данные. При этом была также показана активация вторичной сенсомоторной коры и областей, входящих в систему зеркальных нейронов, в ипсилатеральном полушарии, что позволяло ожидать изменения амплитуды мио-ритма на ипсилатеральной стороне в зависимости от выраженности иллюзии, однако их не было обнаружено. Наблюдаемые нами изменения концентраций HbO и HbR могут отражать так называемый «сенсомоторный парадокс», заключающийся в невозможности четко определить направление гемодинамического ответа на тактильную стимуляцию и обусловленный сложностью паттерна одновременной активации и деактивации различных нейронных популяций [29]. Данный феномен представляет серьезную методологическую проблему при использовании БИКС для изучения мозговой активности в рамках зеркальной парадигмы, особенно с учетом влияния параметров стимуляции и вовлечения множественных сенсорных модальностей [30]. Можно предположить, что для дальнейших исследований и объяснения атипичных изменений гемодинамических показателей при сенсорной стимуляции с зеркальной обратной связью необходимы более простые протоколы стимуляции, например, применение только твердого или только мягкого предмета.

В данном исследовании не выявлено корреляции между большинством количественных показателей ЭЭГ и БИКС для идентичных экспериментальных условий. Корреляция между степенью десинхронизации ритма в альфа-диапазоне и увеличением концентрации HbO наблюдалась только в области задней теменной коры при движении рукой перед зеркалом. В доступной литературе не удалось обнаружить другие работы по совместной регистрации электрофизиологических и гемодинамических показателей активности головного мозга во время экспериментов с зеркальной визуальной обратной связью. В дальнейшем требуется анализ дополнительных показателей, например,

индексов латерализации или коннективности. В целом, можно заключить, что ЭЭГ и БИКС могут дополнять, но не заменять друг друга в комплексном исследовании нейрофизиологических механизмов ЗИ.

Отдельные субъективные характеристики ЗИ слабо коррелировали со степенью десинхронизации ипсилатерального мио-ритма и показателями активации дополнительной моторной коры. Однако большинство субъективных характеристик ЗИ не коррелировали с электрофизиологическими и гемодинамическими показателями активности коры головного мозга, но демонстрировали значимую корреляцию с выраженностью эмоциональной реакции на возникающую иллюзию. Диссоциация между объективными нейрофизиологическими показателями и субъективными переживаниями иллюзии может свидетельствовать о многоуровневой или сетевой организации формирования иллюзорного опыта, а не активности изолированных корковых областей [18]. Эмоциональная реакция на иллюзию может служить интегративным показателем, отражающим не только перцептивные аспекты, но и личностные особенности участников, их готовность принять иллюзорный опыт и общую эмоциональную реактивность.

Выявленная билатеральная активация первичных сенсомоторных областей при движении одной рукой перед зеркалом имеет потенциальное клиническое значение для оптимизации протоколов зеркальной терапии. Полученные данные обосновывают целесообразность применения двигательной парадигмы зеркальной терапии для пациентов с постинсультным гемипарезом, поскольку она обеспечивает активацию моторных структур ипсилатерального полушария, что может способствовать восстановлению межполушарного функционального баланса. Выявленная тесная связь субъективных характеристик зеркальной иллюзии с эмоциональной реакцией предполагает, что позитивный эмоциональный отклик пациента на первых сеансах может служить предиктором эффективности терапии, отражая степень вовлеченности пациента в реабилитационный процесс. Продемонстрированная возможность комбинации ЭЭГ и БИКС открывает перспективы для разработки гибридных технологий нейробиоуправления. Это позволяет прогнозировать эффективность лечения и индивидуализировать реабилитационные программы на основе нейрофизиологических биомаркеров, в том

числе для пациентов с ограничениями к традиционной зеркальной терапии, например, при двусторонней ампутации с фантомным болевым синдромом.

Данное исследование имеет следующие ограничения: отсутствие технической возможности фиксации участниками времени возникновения ЗИ (например, с помощью педали); отсутствие экспериментального блока с движением одной руки без зеркала в качестве контрольного условия; применение упрощенного опросника восприятия ЗИ. Однако ограничения не влияют на основные выводы по результатам исследования. Следует также отметить, что в условиях данного эксперимента невозможно полностью разделить эмоциональную реакцию на зеркальную иллюзию и реакцию новизны на необычный сенсорный опыт, поскольку оценку проводили однократно, без повторных измерений при привыкании к стимулу. Некоторые из фиксируемых эмоциональных состояний (удивление, интерес) могут частично отражать ориентировочный рефлекс на новый перцептивный опыт. Дифференциация этих компонентов может быть предметом будущих лонгитюдных исследований.

ВЫВОДЫ

Таким образом, движение рукой перед зеркалом сопровождается билатеральной активацией первичных сенсомоторных областей обоих полушарий. Корреляции между ЭЭГ и БИКС-показателями выявлены лишь в задней теменной коре, из чего следует, что ЭЭГ и БИКС дополняют, но не заменяют друг друга при изучении ЗИ. Субъективные характеристики иллюзии коррелировали с эмоциональной реакцией, и лишь отдельные из них слабо коррелировали с нейрофизиологическими показателями, что соответствует концепции о многоуровневой сетевой организации механизмов формирования ЗИ. В последующих работах целесообразно провести совместную регистрацию ЭЭГ и БИКС во время проведения зеркальной терапии пациентам с постампутационной фантомной болью или постинсультным гемипарезом, а также оценить динамику выявленных нейромаркеров ЗИ на фоне курса зеркальной терапии. Полученные в таких исследованиях данные можно сравнить с нормой и учесть при разработке технологий нейробиоуправления с обратной связью по ЭЭГ- и БИКС-сигналам для коррекции указанных патологий.

Литература

1. Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D. Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proc Biol Sci.* 1996; 263: 377–86.
2. Deconinck FJA, Smorenburg ARP, Benham A, Ledebt A, Feltham MG, Savelsbergh GJP. Reflections on Mirror Therapy: A Systematic Review of the Effect of Mirror Visual Feedback on the Brain. *Neurorehabilitation and Neural Repair.* 2015; 29: 349–61.
3. Zhang JJQ, Fong KNK, Welage N, Liu KPY. The Activation of the Mirror Neuron System during Action Observation and Action Execution with Mirror Visual Feedback in Stroke: A Systematic Review. *Neural Plast.* 2018; 2018: 2321045.
4. Zhang K, Ding L, Wang X, et al. Mirror therapy reduces excessive variability of motor network in stroke patients: a randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2025; 61: 184–94.
5. Zhuang J, Lei X, Guo X, Ding L, Jia J. Motor and parietal cortex activity responses to mirror visual feedback in patients with subacute stroke: An EEG study. *Clin Neurophysiol Pract.* 2025; 10: 12–21.
6. Xie H-M, Zhang K-X, Wang S, et al. Effectiveness of Mirror Therapy for Phantom Limb Pain: A Systematic Review and Meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2022; 103: 988–97.
7. Мокиенко О. А., Ивкина М. В. Методы лечения фантомной боли с позиций доказательной медицины. *Российский неврологический журнал.* 2023; 28(6): 11–18.
8. Thieme H, Morkisch N, Mehrholz J, et al. Mirror therapy for improving motor function after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2018; 7: CD008449.
9. Jaafar N, Che Daud AZ, Ahmad Roslan NF, Mansor W. Mirror Therapy Rehabilitation in Stroke: A Scoping Review of Upper Limb Recovery and Brain Activities. *Rehabil Res Pract.* 2021; 2021: 9487319.
10. Kim H, Lee E, Jung J, Lee S. Utilization of Mirror Visual Feedback

- for Upper Limb Function in Poststroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Vision* (Basel). 2023; 7.
11. McCabe CS, Haigh RC, Ring EFJ, Halligan PW, Wall PD, Blake DR. A controlled pilot study of the utility of mirror visual feedback in the treatment of complex regional pain syndrome (type 1). *Rheumatology* (Oxford). 2003; 42: 97–101.
 12. Vladimir Tichelaar YIG, Geertzen JHB, Keizer D, Paul van Wilgen C. Mirror box therapy added to cognitive behavioural therapy in three chronic complex regional pain syndrome type I patients: a pilot study. *Int J Rehabil Res*. 2007; 30: 181–8.
 13. Pervane Vural S, Nakipoglu Yuzer GF, Sezgin Ozcan D, Demir Ozbudak S, Ozgirgin N. Effects of Mirror Therapy in Stroke Patients With Complex Regional Pain Syndrome Type 1: A Randomized Controlled Study. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016; 97: 575–81.
 14. Machač S, Chasáková L, Kakawand S, et al. Mirror visual feedback as therapeutic modality in unilateral upper extremity complex regional pain syndrome type I: randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2024; 60: 280–91.
 15. Bullock K, Won AS, Bailenson J, Friedman R. Virtual Reality-Delivered Mirror Visual Feedback and Exposure Therapy for FND: A Midpoint Report of a Randomized Controlled Feasibility Study. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*. 2020; 32: 90–4.
 16. Limakatso K, Cashin AG, Williams S, Devonshire J, Parker R, McAuley JH. The Efficacy of Graded Motor Imagery and Its Components on Phantom Limb Pain and Disability: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Can J Pain*. 2023; 7: 2188899.
 17. Rizzo M, Petrini L, Del Percio C, Lopez S, Arendt-Nielsen L, Babiloni C. Mirror visual feedback during unilateral finger movements is related to the desynchronization of cortical electroencephalographic somatomotor alpha rhythms. *Psychophysiology*. 2022; 59: e14116.
 18. Rizzo M, Del Percio C, Petrini L, Lopez S, Arendt-Nielsen L, Babiloni C. Cortical sources of electroencephalographic alpha rhythms related to the anticipation and experience of mirror visual feedback-induced illusion of finger movements. *Psychophysiology*. 2023; 60: e14281.
 19. Norris TA, Augenstein TE, Rodriguez KM, Claflin ES, Krishnan C. Shaping corticospinal pathways in virtual reality: effects of task complexity and sensory feedback during mirror therapy in neurologically intact individuals. *J Neuroeng Rehabil*. 2024; 21: 154.
 20. Yarossi M, Manuweera T, Adamovich SV, Tunik E. The Effects of Mirror Feedback during Target Directed Movements on Ipsilateral Corticospinal Excitability. *Front Hum Neurosci*. 2017; 11: 242.
 21. Tai R-Y, Zhu J-D, Chen C-C, Hsieh Y-W, Cheng C-H. Modulation of Functional Connectivity in Response to Mirror Visual Feedback in Stroke Survivors: An MEG Study. *Brain Sci*. 2021; 11.
 22. Cheng C-H, Lin S-H, Wu C-Y, Liao Y-H, Chang K-C, Hsieh Y-W. Mirror Illusion Modulates M1 Activities and Functional Connectivity Patterns of Perceptual-Attention Circuits During Bimanual Movements: A Magnetoencephalography Study. *Front Neurosci*. 2019; 13: 1363.
 23. Wang J, Fritsch C, Bernarding J, et al. Cerebral activation evoked by the mirror illusion of the hand in stroke patients compared to normal subjects. *NeuroRehabilitation*. 2013; 33: 593–603.
 24. Bai Z, Fong KNK, Zhang J, Hu Z. Cortical mapping of mirror visual feedback training for unilateral upper extremity: A functional near-infrared spectroscopy study. *Brain Behav*. 2020; 10: e01489.
 25. Tsou M-H, Chen P-Y, Hung Y-T, Lim Y-W, Huang S-L, Liu Y-C. Comparison of Brain Activation Between Different Modes of Motor Acquisition: A Functional Near-Infrared Study. *Brain Behav*. 2025; 15: e70238.
 26. Delorme A, Palmer J, Onton J, Oostenveld R, Makeig S. Independent EEG sources are dipolar. *PLoS One*. 2012; 7: e30135.
 27. Frolov A, Bobrov P, Biryukova E, et al. Using Multiple Decomposition Methods and Cluster Analysis to Find and Categorize Typical Patterns of EEG Activity in Motor Imagery Brain-Computer Interface Experiments. *Front Robot AI*. 2020; 7: 88.
 28. Dubová D, Dvořáčková D, Pavlů D, Pánek D. Cerebral Projection of Mirrored Touch via sLORETA Imaging. *Life* (Basel). 2023; 13. DOI:10.3390/life13051201.
 29. Seiyama A, Seki J, Tanabe HC, et al. Circulatory basis of fMRI signals: relationship between changes in the hemodynamic parameters and BOLD signal intensity. *Neuroimage*. 2004; 21: 1204–14.
 30. Seiyama A, Miura T, Okahashi S, Konishi N, Cassim M. Visual effects on tactile stimulation and its perception: A pilot study using near-infrared spectroscopy. *MethodsX*. 2024; 13: 102849.

References

1. Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D. Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proc Biol Sci*. 1996; 263: 377–86.
2. Deconinck FJA, Smorenburg ARP, Benham A, Ledebt A, Feltham MG, Savelsbergh GJP. Reflections on Mirror Therapy: A Systematic Review of the Effect of Mirror Visual Feedback on the Brain. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2015; 29: 349–61.
3. Zhang JJQ, Fong KNK, Welage N, Liu KPY. The Activation of the Mirror Neuron System during Action Observation and Action Execution with Mirror Visual Feedback in Stroke: A Systematic Review. *Neural Plast*. 2018; 2018: 2321045.
4. Zhang K, Ding L, Wang X, et al. Mirror therapy reduces excessive variability of motor network in stroke patients: a randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2025; 61: 184–94.
5. Zhuang J, Lei X, Guo X, Ding L, Jia J. Motor and parietal cortex activity responses to mirror visual feedback in patients with subacute stroke: An EEG study. *Clin Neurophysiol Pract*. 2025; 10: 12–21.
6. Xie H-M, Zhang K-X, Wang S, et al. Effectiveness of Mirror Therapy for Phantom Limb Pain: A Systematic Review and Meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2022; 103: 988–97.
7. Мокиенко О. А., Ивкина М. В. Методы лечения фантомной боли с позиций доказательной медицины. *Российский неврологический журнал*. 2023; 28(6): 11–18.
8. Thieme H, Morkisch N, Mehrholz J, et al. Mirror therapy for improving motor function after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2018; 7: CD008449.
9. Jaafar N, Che Daud AZ, Ahmad Roslan NF, Mansor W. Mirror Therapy Rehabilitation in Stroke: A Scoping Review of Upper Limb Recovery and Brain Activities. *Rehabil Res Pract*. 2021; 2021: 9487319.
10. Kim H, Lee E, Jung J, Lee S. Utilization of Mirror Visual Feedback for Upper Limb Function in Poststroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Vision* (Basel). 2023; 7.
11. McCabe CS, Haigh RC, Ring EFJ, Halligan PW, Wall PD, Blake DR. A controlled pilot study of the utility of mirror visual feedback in the treatment of complex regional pain syndrome (type 1). *Rheumatology* (Oxford). 2003; 42: 97–101.
12. Vladimir Tichelaar YIG, Geertzen JHB, Keizer D, Paul van Wilgen C. Mirror box therapy added to cognitive behavioural therapy in three chronic complex regional pain syndrome type I patients: a pilot study. *Int J Rehabil Res*. 2007; 30: 181–8.
13. Pervane Vural S, Nakipoglu Yuzer GF, Sezgin Ozcan D, Demir Ozbudak S, Ozgirgin N. Effects of Mirror Therapy in Stroke Patients With Complex Regional Pain Syndrome Type 1: A Randomized Controlled Study. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016; 97: 575–81.
14. Machač S, Chasáková L, Kakawand S, et al. Mirror visual feedback as therapeutic modality in unilateral upper extremity complex regional pain syndrome type I: randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2024; 60: 280–91.
15. Bullock K, Won AS, Bailenson J, Friedman R. Virtual Reality-Delivered Mirror Visual Feedback and Exposure Therapy for FND: A Midpoint Report of a Randomized Controlled Feasibility Study. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*. 2020; 32: 90–4.
16. Limakatso K, Cashin AG, Williams S, Devonshire J, Parker R, McAuley JH. The Efficacy of Graded Motor Imagery and Its Components on Phantom Limb Pain and Disability: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Can J Pain*. 2023; 7: 2188899.

17. Rizzo M, Petrini L, Del Percio C, Lopez S, Arendt-Nielsen L, Babiloni C. Mirror visual feedback during unilateral finger movements is related to the desynchronization of cortical electroencephalographic somatomotor alpha rhythms. *Psychophysiology*. 2022; 59: e14116.
18. Rizzo M, Del Percio C, Petrini L, Lopez S, Arendt-Nielsen L, Babiloni C. Cortical sources of electroencephalographic alpha rhythms related to the anticipation and experience of mirror visual feedback-induced illusion of finger movements. *Psychophysiology*. 2023; 60: e14281.
19. Norris TA, Augenstein TE, Rodriguez KM, Claflin ES, Krishnan C. Shaping corticospinal pathways in virtual reality: effects of task complexity and sensory feedback during mirror therapy in neurologically intact individuals. *J Neuroeng Rehabil*. 2024; 21: 154.
20. Yarossi M, Manuweera T, Adamovich SV, Tunik E. The Effects of Mirror Feedback during Target Directed Movements on Ipsilateral Corticospinal Excitability. *Front Hum Neurosci*. 2017; 11: 242.
21. Tai R-Y, Zhu J-D, Chen C-C, Hsieh Y-W, Cheng C-H. Modulation of Functional Connectivity in Response to Mirror Visual Feedback in Stroke Survivors: An MEG Study. *Brain Sci*. 2021; 11.
22. Cheng C-H, Lin S-H, Wu C-Y, Liao Y-H, Chang K-C, Hsieh Y-W. Mirror Illusion Modulates M1 Activities and Functional Connectivity Patterns of Perceptual-Attention Circuits During Bimanual Movements: A Magnetoencephalography Study. *Front Neurosci*. 2019; 13: 1363.
23. Wang J, Fritzsche C, Bernarding J, et al. Cerebral activation evoked by the mirror illusion of the hand in stroke patients compared to normal subjects. *NeuroRehabilitation*. 2013; 33: 593–603.
24. Bai Z, Fong KNK, Zhang J, Hu Z. Cortical mapping of mirror visual feedback training for unilateral upper extremity: A functional near-infrared spectroscopy study. *Brain Behav*. 2020; 10: e01489.
25. Tsou M-H, Chen P-Y, Hung Y-T, Lim Y-W, Huang S-L, Liu Y-C. Comparison of Brain Activation Between Different Modes of Motor Acquisition: A Functional Near-Infrared Study. *Brain Behav*. 2025; 15: e70238.
26. Delorme A, Palmer J, Onton J, Oostenveld R, Makeig S. Independent EEG sources are dipolar. *PLoS One*. 2012; 7: e30135.
27. Frolov A, Bobrov P, Biryukova E, et al. Using Multiple Decomposition Methods and Cluster Analysis to Find and Categorize Typical Patterns of EEG Activity in Motor Imagery Brain-Computer Interface Experiments. *Front Robot AI*. 2020; 7: 88.
28. Dubová D, Dvořáčková D, Pavlů D, Pánek D. Cerebral Projection of Mirrored Touch via sLORETA Imaging. *Life (Basel)*. 2023; 13. DOI:10.3390/life13051201.
29. Seiyama A, Seki J, Tanabe HC, et al. Circulatory basis of fMRI signals: relationship between changes in the hemodynamic parameters and BOLD signal intensity. *Neuroimage*. 2004; 21: 1204–14.
30. Seiyama A, Miura T, Okahashi S, Konishi N, Cassim M. Visual effects on tactile stimulation and its perception: A pilot study using near-infrared spectroscopy. *MethodsX*. 2024; 13: 102849.