

АНТИПОВ В.М.,

ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, г. Москва, Россия; БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия, e-mail: vantipovm@gmail.com

СМИРНОВ Н.М.,

БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия, e-mail: nikita.smirnov.m@gmail.com

БАДАРИН А.А.,

к. ф.-м. н., ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, Москва, Россия; БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия, e-mail: Badarin.a.a@mail.ru

КИСЕЛЕВ А.Р.,

д. м. н., ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, г. Москва, Россия, e-mail: kiselev@gnicpm.ru

АНДРЕЕВ А.В.,

к. ф.-м. н., ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, г. Москва, Россия, БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия, e-mail: andreevandre1993@gmail.com

КУРКИН С.А.,

д. ф.-м. н., доцент, ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, г. Москва, Россия, БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия, e-mail: kurkinsa@gmail.com

ХРАМОВ А.Е.,

д. ф.-м. н., профессор, БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия, e-mail: hramovae@gmail.com

ДРАПКИНА О.М.,

академик РАН, д. м. н., профессор, ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, г. Москва, Россия, e-mail: drapkina@bk.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСОВ МОЗГ–КОМПЬЮТЕР ДЛЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ: РОЛЬ СУБЪЕКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ И НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

DOI: 10.25881/18110193_2025_2_84

Аннотация. Работа посвящена оценке соответствия нейрофизиологических и субъективных признаков моторного воображения в контексте нейрореабилитации с использованием интерфейсов мозг–компьютер (ИМК) и выполнена в рамках разработки программно-аппаратного комплекса (ПАК) для восстановления когнитивных и моторных функций верхних конечностей при лёгких и выраженных нарушениях.

Материалы и методы: В исследовании приняли участие 24 здоровых добровольца. Электроэнцефалограмма регистрировалась при выполнении заданий на моторное воображение с различными визуальными стимулами. Анализ включал расчёт сенсомоторной десинхронизации (ERD), классификацию с использованием пространственных фильтров и линейного дискриминантного анализа, а также оценку корреляции с субъективными самооценками.

Результаты: Латеральность воображаемого движения оказала значимое влияние на выраженность ERD. Субъективная уверенность участников не коррелировала ни с нейрофизиологическими показателями, ни с уверенностью классификатора при распознавании воображаемого движения. При этом модели продемонстрировали высокую точность классификации моторных представлений.

Выводы: Выявленное несоответствие между субъективной и объективной оценкой подчеркивает необходимость внедрения биологической обратной связи и персонализированных ИМК в составе ПАК для повышения эффективности нейрореабилитации.

Ключевые слова: реабилитация, моторные нарушения, когнитивные нарушения, биологическая обратная связь, воображаемые движения, субъективная оценка.

Для цитирования: Антипов В.М., Смирнов Н.М., Бадарин А.А., Киселев А.Р., Андреев А.В., Куркин С.А., Храмов А.Е., Драпкина О.М. Использование интерфейсов мозг-компьютер для персонализированной нейрореабилитации: роль субъективного восприятия и нейрофизиологических показателей. Врач и информационные технологии. 2025; 2: 84-97. doi: 10.25881/18110193_2025_2_84.

ANTIPOV V.M.,

FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia,
e-mail: vantipovm@gmail.com

SMIRNOV N.M.,

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: nikita.smirnov.m@gmail.com

BADARIN A.A.,

PhD, FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia,
e-mail: Badarin.a.a@mail.ru

KISELEV A.R.,

DSc, FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia, e-mail: kiselev@gnicpm.ru

ANDREEV A.V.,

PhD, FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: andreevandre1993@gmail.com

KURKIN S.A.,

DSc, Associated Professor, FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: kurkinsa@gmail.com

HRAMOV A.E.,

DSc, Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: hramovae@gmail.com

DRAPKINA O.M.,

PhD, Academician of the RAS, DSc, Professor, FSBI "NMIC TPM" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia, e-mail: drapkina@bk.ru

USING BRAIN-COMPUTER INTERFACES FOR PERSONALIZED NEUROREHABILITATION: THE ROLE OF SUBJECTIVE PERCEPTION AND NEUROPHYSIOLOGICAL INDICATORS

DOI: 10.25881/18110193_2025_2_84

Abstract. *The study was set to assess the correspondence between neurophysiological and subjective indicators of motor imagination in the context of neurorehabilitation using brain-computer interfaces (BCIs). It was conducted as part of the development of a software and hardware complex (SHC) aimed at restoring cognitive and motor functions of the upper limbs in individuals with mild to severe impairments.*

Materials and Methods: Twenty-four healthy volunteers participated in the study. Electroencephalographic activity was recorded during motor imagery tasks involving different types of visual stimuli. The analysis included the calculation of sensorimotor desynchronization (ERD), classification using spatial filters and linear discriminant analysis, and correlation with subjective self-assessments.

Results: The lateralization of imagined motion had a significant effect on ERD expression. Participants' subjective confidence did not correlate with either neurophysiological measures or the classifier's confidence in recognizing the imagined motion. However, the models demonstrated high accuracy in classifying motor representations.

Conclusions: The identified discrepancy between subjective and objective assessment highlights the need to implement biofeedback and personalized BCIs into SHC systems to enhance the effectiveness of neurorehabilitation.

Keywords: *rehabilitation, motor disorders, cognitive disorders, biofeedback, motor imagery, subjective assessment.*

For citation: *Antipov V.M., Smirnov N.M., Badarin A.A., Kiselev A.R., Andreev A.V., Kurkin S.A., Hramov A.E., Drapkina O.M. Using brain-computer interfaces for personalized neurorehabilitation: the role of subjective perception and neurophysiological indicators. Medical doctor and information technology. 2025; 2: 84-97. doi: 10.25881/18110193_2025_2_84.*

ВВЕДЕНИЕ

Хронические когнитивные и двигательные нарушения, возникающие в результате инсульта, нейродегенеративных заболеваний и других поражений центральной нервной системы, остаются одной из ключевых причин длительной утраты трудоспособности и снижения качества жизни. В частности, инсульт признан одной из ведущих причин неврологической инвалидизации, а также третьей по частоте причиной смертности в мире [1]. Здесь следует отметить, что за последние 30 лет риск инсульта у взрослого населения вырос почти на 9%, при этом половина перенесших инсульт людей становятся хронически нетрудоспособными, сталкиваясь с устойчивыми двигательными и когнитивными дефицитами [2]. Более того, согласно недавнему исследованию, почти каждый пятый пациент, перенёсший инсульт, в последующем сталкивается с развитием деменции. При этом риск деменции у таких пациентов оказывается на 80% выше по сравнению с лицами без инсульта, особенно в первый год после эпизода. Повторный инсульт увеличивает этот риск в три раза [3]. Наряду с сосудистыми патологиями, всё большее внимание привлекают отдалённые последствия инфекционных заболеваний, таких как COVID-19, способных вызывать стойкие нейрокогнитивные расстройства, сохраняющиеся даже после окончания острого периода заболевания [4].

В условиях нарастающей эпидемиологической нагрузки на реабилитационные отделения особенно актуальным становится поиск эффективных, масштабируемых и физиологически обоснованных подходов к восстановлению утраченных функций и профилактике их снижения [5]. Одним из наиболее актуальных направлений является использование интерфейсов мозг-компьютер (ИМК), которые позволяют адаптировать восстановительный процесс к функциональным возможностям конкретного пациента [6–9]. Перспективной основой для реализации этих технологий служит моторное воображение — ментальное воспроизведение движений без их реального выполнения. Воображаемое движение способно активировать сенсомоторные области мозга и тем самым стимулировать нейропластичность. Это делает ИМК, основанные на моторном воображении, особенно ценными в ранний восстановительный период,

когда выполнение активных движений затруднено или невозможно.

Несмотря на теоретическую эффективность подобных интерфейсов, их практическое применение сопряжено с рядом трудностей. Основная из них заключается в высокой межиндивидуальной вариабельности выраженности нейрофизиологических паттернов, возникающих при воображении движения [7, 10, 11]. Эта вариабельность традиционно воспринимается как техническая помеха, затрудняющая обучение универсальных моделей искусственного интеллекта (ИИ) для управления ИМК и требующая разработки персонализированных подходов [12, 13]. Однако она может также отражать более фундаментальные различия между людьми — в том, насколько успешно и осознанно они способны формировать внутренние моторные образы.

В этой связи всё большее значение приобретает субъективная оценка участником успешности выполнения задачи [14]. Такая оценка может служить внешним выражением того, насколько участник ощущает контроль над внутренним состоянием, необходимым для генерации устойчивых нейрофизиологических паттернов активности мозга, которые надежно и с высокой точностью могут быть распознаны интеллектуальной системой ИМК [7]. Вместе с тем вопрос о том, какую роль субъективная уверенность играет в формировании и модуляции сигналов, используемых в ИМК, остаётся до конца не прояснённым.

В основе настоящего исследования лежит представление о том, что субъективное переживание успешности моторного воображения и его нейрофизиологические корреляты представляют собой разные, хотя и взаимосвязанные аспекты одного процесса. Их соответствие не является автоматическим: оно формируется в ходе опыта и может существенно различаться между людьми. Способность осознавать собственное состояние воображаемого действия не только влияет на поведенческие и когнитивные показатели, но и определяет эффективность взаимодействия с ИМК. В этой связи важным становится не просто фиксировать наличие или отсутствие нейронной активности, соответствующей моторному воображению, но и учитывать, насколько осознанно участник воспринимает и оценивает происходящее.

Возникающая нейронная активность при воображении может зависеть не только от индивидуальных особенностей, но и от характеристик внешнего стимула, с которым связывается задание на воображение [15]. В частности, наглядные стимулы, такие как изображение руки, способны активировать телесные репрезентации более непосредственно, чем абстрактные указатели, например точки на экране. Эти различия в форме предъявления задачи могут оказывать влияние на глубину сенсомоторной десинхронизации и субъективное восприятие выполненного действия. Учитывая этот фактор, настоящее исследование также направлено на оценку того, как тип стимула влияет на выраженность нейрофизиологических признаков моторного воображения и субъективную уверенность в его успешности.

Биологическая обратная связь в ИМК изначально направлена на развитие саморегуляции у пациентов [16]. Получая информацию о нейрофизиологическом состоянии в реальном времени, пользователь ИМК учится осознанно воспроизводить паттерны активности мозга, необходимые для управления интерфейсом. В реабилитационном контексте это особенно важно, поскольку формирование навыков моторного воображения требует не только активации сенсомоторных сетей, но и осознания собственных ментальных состояний. Если между субъективной уверенностью и объективными признаками моторного воображения отсутствует согласование, это может указывать на недостаточную сформированность навыка саморегуляции. В таких случаях обратная связь выполняет обучающую функцию, способствуя постепенному сближению осознанного контроля и нейрофизиологических процессов. Анализ этой связи позволяет точнее адаптировать интеллектуальную управляющую систему ИМК к индивидуальным особенностям пациента и повысить эффективность ее работы в реабилитации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Участники и экспериментальная парадигма

В исследовании приняли участие 24 здоровых добровольца (возраст 20–32 года, среднее значение $25,3 \pm 3,4$), не имеющих неврологических или психических заболеваний. Проведение эксперимента было одобрено Независимым

этическим комитетом Центра клинических исследований ФГАО ВО «Балтийский федеральный университет имени И. Канта» (выписка из протокола заседания № 48 от 15.10.2024). Все участники дали письменное информированное согласие. Эксперимент был направлен на изучение нейрофизиологических и субъективных аспектов моторного воображения, включая влияние типа визуального стимула и субъективной оценки на выраженность соответствующих паттернов мозговой активности.

На рисунке 1А изображена общая структура экспериментальной процедуры, которая включала несколько этапов. Вначале проводилась глазная разминка (калибровка), в ходе которой участники выполняли управляемые глазодвигательные действия (саккады, фиксации, моргания) по команде. Эти данные впоследствии использовались для идентификации глазодвигательной активности с помощью метода анализа независимых компонент (ICA), что позволяло выявлять и удалять глазодвигательные артефакты, тем самым повышая качество ЭЭГ-сигнала в основной задаче. Далее регистрировалась фоновая активность — 1 минута ЭЭГ в состоянии покоя без предъявления стимулов. Этот отрезок использовался как базовая референсная точка для последующего анализа.

Основной блок эксперимента включал 60 проб (триалов) моторного воображения, равномерно распределённых между четырьмя условиями. Участникам предъявлялись визуальные стимулы двух типов: реалистичное изображение кисти руки (левой или правой) и абстрактная точка, расположенная слева или справа от центра экрана. В условиях с изображением руки испытуемым предлагалось вообразить движение соответствующей рукой. В условиях с точкой участники также должны были вообразить движение — левой рукой при появлении точки слева и правой рукой при её расположении справа. Таким образом, стимулы различались как по форме (наглядный/абстрактный), так и по стороне целевого воображаемого движения (левый/правый).

Каждая проба имела чёткую структуру и состояла из четырёх последовательно сменяющихся друг друга стадий (см. рис. 1Б). Сначала в течение четырех секунд на экране отображался нейтральный фон (отдых), затем предъявлялся крест

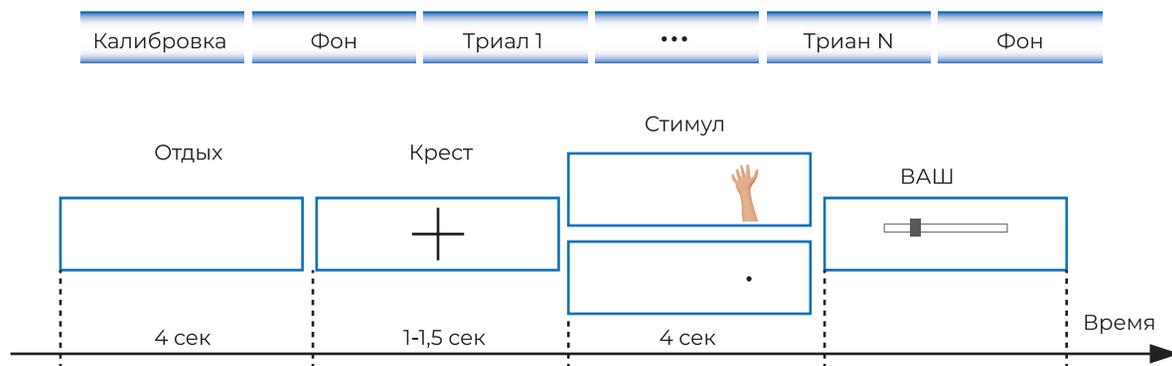


Рисунок 1 — А) Общая структура экспериментальной процедуры: калибровка — управляемая разминка для глаз, триал — повторяющийся набор стимулов (проба), фон — активность в состоянии покоя без предъявления стимулов. Б) Общая структура триала: ВАШ — визуальная аналоговая шкала для субъективной оценки успешности воображения.

(фиксация внимания). Длительность креста выбиралась случайно из интервала 1–1,5 с. После этого предъявлялся визуальный стимул, запускающий моторное воображение, которое длилось четыре секунды. Завершалась проба фазой субъективной самооценки: участнику предлагалось указать, насколько хорошо ему удалось представить движение, с помощью визуальной аналоговой шкалы (ВАШ), варьирующейся от «плохо» до «хорошо». Время на оценку не ограничивалось и в среднем составляло 3–5 с. После завершения основного блока проводилась заключительная фоновая запись (1 минута), аналогичная начальному этапу.

Отметим, что субъективные оценки после каждого акта воображения играли двойную роль: они обеспечивали участнику внутреннюю обратную связь и одновременно служили дополнительным параметром для анализа. В дальнейшем они использовались для сопоставления с нейрофизиологическими характеристиками, а также для возможного исключения низкокачественных проб при обучении классификаторов. Общая длительность экспериментального сеанса составляла около 20 минут.

Регистрация и анализ ЭЭГ-сигналов

ЭЭГ регистрировалась с применением портативной системы регистрации NeoRec cap 21, разработанной для проведения высокоточных нейрофизиологических измерений в

клинических и исследовательских условиях. Устройство обеспечивало одновременную регистрацию биопотенциалов по 21 каналу, при этом электрод Fpz использовался в качестве заземляющего, а Fz служил референсным электродом. Пространственное размещение регистрирующих электродов строго соответствовало международной системе «10–20», что обеспечивало стандартизацию получаемых данных и возможность их сопоставления с результатами других исследований.

Для количественной оценки сенсомоторной десинхронизации (event-related desynchronization, ERD) в задаче моторного воображения использовался индекс ERD в диапазонах сенсомоторных ритмов. Анализ проводился в диапазонах мю (μ , 8–13 Гц) и бета (β , 13–30 Гц) частот, характерных для активации сенсомоторной коры при реальных и воображаемых движениях [17, 18]. Расчёты выполнялись отдельно для каждого диапазона, после чего вычислялось их среднее значение, отражающее общую степень подавления ритмической активности, связанной с активацией моторных областей. Отметим, что частотно-временной анализ сигнала выполнялся с использованием непрерывного комплексного вейвлет-преобразования на основе материнской функции Морле, что обеспечивало высокое разрешение как во временной, так и в частотной областях [19].

Вычисление ERD выполнялось отдельно для каждого диапазона в соответствии со следующей формулой:

$$ERD = \frac{P_{rest} - P_{imag}}{P_{rest}}$$

где: P_{rest} — средняя мощность сигнала в состоянии покоя (до стимула), P_{imag} — мощность во время фазы моторного воображения. Положительные значения ERD указывают на десинхронизацию (подавление ритмической активности).

Значения ERD рассчитывались отдельно для каждого диапазона μ и β , а затем усреднялись для получения интегрального показателя:

$$\overline{ERD} = \frac{ERD_{\mu} + ERD_{\beta}}{2}$$

где: ERD_{μ} и ERD_{β} — значения десинхронизации в мю- и бета-диапазонах соответственно.

Анализ интегрального индекса десинхронизации выполнялся по данным электродов C3 и C4, расположенных над сенсомоторными областями левого и правого полушария, соответственно. Эти позиции соответствуют проекциям первичной моторной коры (M1), играющей ключевую роль в иницировании как реальных, так и воображаемых движений рук [20]. Полученные значения \overline{ERD} использовались для последующего анализа зависимости выраженности моторного воображения от типа визуального стимула.

Для оценки влияния типа стимула и воображаемой стороны движения на величину десинхронизации был проведён дисперсионный анализ с повторными измерениями (repeated-measures ANOVA). В качестве факторов рассматривались тип визуального стимула (рука или точка) и воображаемая рука (левая или правая). Анализ выполнялся отдельно для электродов C3 и C4, чтобы учитывать возможную латерализацию сенсомоторной активности, обусловленную контралатеральной организацией моторной коры.

Отметим, что перед проведением статистического анализа данные были подвергнуты стандартизации методом z-преобразования (z-score) отдельно для каждого участника. Такая нормализация позволяет уменьшить межсубъектные различия в масштабе значений, обеспечивая корректность последующего сравнения индивидуальных данных на групповом уровне.

Классификация и оценка соответствия модельной и субъективной уверенности

Для каждого участника индивидуально строилась модель классификации на основе метода общих пространственных шаблонов (Common Spatial Patterns, CSP) и линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis, LDA) [13, 21]. CSP-преобразование выполнялось с использованием данных со всех доступных ЭЭГ-электродов, что позволяло извлекать пространственные фильтры, максимально различающие воображение левой и правой руки. Далее признаки, полученные после проекции сигнала через CSP, подавались на вход LDA-классификатору.

Оценка точности классификации проводилась по схеме перекрёстной проверки leave-one-out, при которой каждый отдельный триал последовательно использовался в качестве тестового, а остальные — для обучения модели. Такой подход обеспечивал устойчивую оценку классификационной точности без риска переобучения. Кроме того, LDA позволял получить для каждого триала апостериорную вероятность принадлежности к соответствующему классу, которая рассматривалась как количественная мера уверенности классификатора в своём решении. Эти значения использовались для дальнейшего анализа связи между объективной уверенностью модели и субъективной оценкой участника.

Для оценки взаимосвязи между субъективной оценкой успешности моторного воображения и степенью уверенности классификатора использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Этот подход позволял выявить направление и силу монотонной зависимости между порядковыми субъективными оценками участников и непрерывными значениями апостериорной вероятности, полученной от LDA-модели на каждом триале. Корреляционный анализ выполнялся отдельно для каждого участника.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки влияния латеральности воображаемого движения (левая / правая рука) и формы визуального стимула (реалистичное изображение кисти или абстрактная точка) на выраженность ERD был выполнен дисперсионный анализ с повторными измерениями (repeated-measures

ANOVA) отдельно для электродов C3 и C4. В анализ были включены данные всех 24 участников, при этом из рассмотрения были исключены триалы, в которых субъективная оценка качества моторного воображения по ВАШ не превышала 25 из 100 баллов, то есть случаи, когда участники были не уверены в успешности выполнения задачи.

Для электрода C3, расположенного над моторной корой, управляющей правой рукой, выявлен значимый основной эффект фактора «воображаемая рука»: десинхронизация была сильнее при воображении движения правой руки ($F(1, 23) = 27,99$, $p < 0,001$). Отмечена тенденция к более выраженной ERD при предъявлении абстрактных точек по сравнению с реалистичными изображениями, однако она не достигла уровня статистической значимости ($F(1, 23) = 3,84$, $p = 0,062$). Взаимодействие между типом стимула и латеральностью воображаемого движения оказалось незначимым ($F(1, 23) = 1,16$, $p = 0,29$).

Аналогично для электрода C4, отражающего активность моторной области левого

полушария, также установлен значимый основной эффект фактора «воображаемая рука»: максимальная десинхронизация регистрировалась при воображении движения левой руки ($F(1, 23) = 25,53$, $p < 0,001$). Фактор «тип стимула» ($F(1, 23) = 0,003$, $p = 0,96$) и взаимодействие факторов ($F(1, 23) = 1,91$, $p = 0,18$) не достигли уровня статистической значимости.

На рисунке 2 представлены усреднённые значения стандартизированных индексов ERD для электродов C3 и C4, которые подтверждают контралатеральную организацию сенсомоторной коры. На электроде C3 десинхронизация максимальна при воображении правой руки, в то время как на C4 наибольшие изменения фиксируются при воображении левой руки вне зависимости от формы стимула. Таким образом, латеральность воображаемого движения является ключевым фактором в выраженности ERD, тогда как форма визуального стимула оказывает лишь ограниченное и, предположительно, косвенное влияние, проявляющееся преимущественно в левом полушарии и, вероятно, связанное

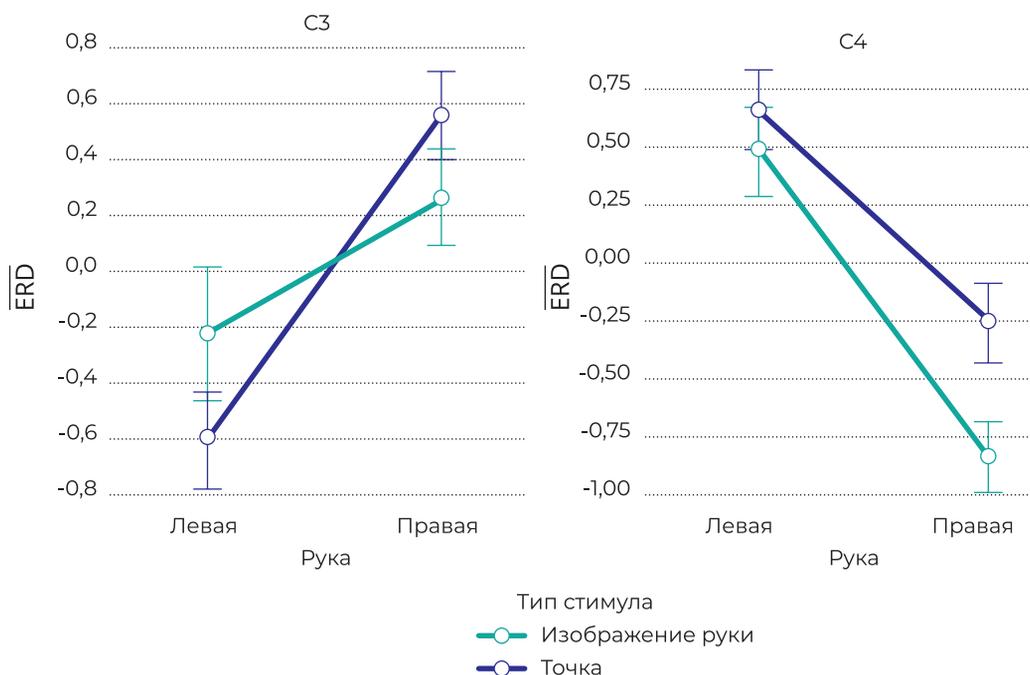


Рисунок 2 — Усреднённые значения стандартизированных индексов десинхронизации ERD для электродов C3 и C4 при воображении движений левой и правой руки, представленные отдельно для условий с изображением руки и абстрактной точки.

с когнитивными механизмами обработки абстрактной информации.

Дополнительно был проведён аналогичный дисперсионный анализ по субъективным оценкам участников. В отличие от нейрофизиологических показателей, субъективное восприятие успешности воображения не зависело ни от латеральности движения ($F(1, 23) = 0,67, p = 0,42$), ни от формы стимула ($F(1, 23) = 0,73, p = 0,40$), ни от их взаимодействия ($F(1, 23) = 0,16, p = 0,69$). Это говорит о том, что феноменологический опыт участников не отражал тех различий в мозговой активности, которые фиксировались объективно, и может указывать на ограниченность осознанного контроля над процессом воображения.

С целью дальнейшего изучения соотношения между субъективным и объективным уровнями представления воображаемого действия был проведён анализ качества индивидуальной

классификации и её согласованности с субъективной уверенностью.

Для каждого участника была построена индивидуальная модель классификации воображаемых движений с использованием таких методов машинного обучения как CSP и LDA. Качество классификации оценивалось на основе перекрёстной проверки по схеме leave-one-out, с расчётом F1-меры как сбалансированного показателя точности. Одновременно для каждого триала извлекалась апостериорная вероятность принадлежности к соответствующему классу, интерпретируемая как количественная мера уверенности классификатора. Эти значения сопоставлялись с субъективной оценкой успешности воображения, заданной участником по визуальной аналоговой шкале.

На рисунке 3 представлены значения F1-метрики и коэффициента корреляции Спирмена

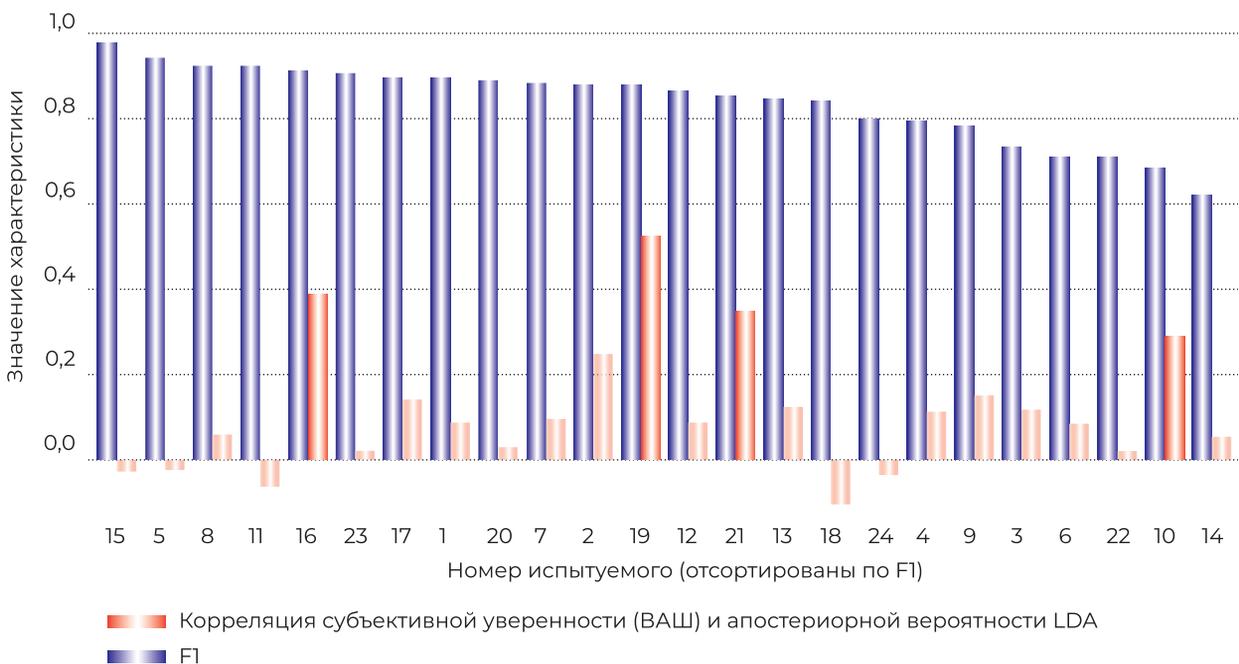


Рисунок 3 — Индивидуальные значения F1-меры классификации моторного воображения, рассчитанной с использованием модели CSP-LDA (сортировка по убыванию). Для каждого участника также представлен коэффициент корреляции Спирмена между субъективной оценкой качества воображения и апостериорной вероятностью, отражающей степень уверенности классификатора в принадлежности данных к воображению движения. Коэффициенты, не достигшие уровня статистической значимости ($p > 0,05$), обозначены полупрозрачным цветом.

между уверенностью модели и субъективной оценкой, отсортированные по убыванию F1. Несмотря на то, что большинство участников продемонстрировали высокие значения F1 (в ряде случаев приближающиеся к 1,0), статистически значимая связь с субъективной уверенностью наблюдалась только у 4 из 24 испытуемых ($p < 0,05$).

Полученные результаты указывают на возможное функциональное рассогласование между нейрофизиологическими паттернами, используемыми моделью для классификации, и субъективной способностью участника отслеживать успешность воображаемого действия. Это может отражать различия в осознанности, стратегии выполнения задачи или в уровне вовлечённости. Иными словами, даже при стабильных нейрофизиологических проявлениях моторного воображения не все участники обладают устойчивым внутренним критерием его успешности, что и приводит к низкому совпадению между оценкой модели и субъективной уверенностью.

Вышеуказанные данные подчёркивают необходимость комплексного подхода к оценке эффективности ИМК-систем, включающего как объективные нейрофизиологические показатели, так и субъективные метрики. Разрыв между ними может служить индикатором недостаточного самоконтроля или неустойчивости ментальных стратегий и может быть использован как основа для персонализированной адаптации и тренировки интерфейса мозг-компьютер.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные убедительно демонстрируют, что главным фактором, влияющим на амплитуду сенсомоторной десинхронизации при моторном воображении, является латеральность предполагаемого движения, тогда как визуальная форма стимула оказывает лишь вторичный эффект. Это согласуется с современной концепцией контралатеральной организации моторной коры, согласно которой максимальная активация нейронных популяций наблюдается при воображении движений противоположной конечности [7, 17, 18]. Лишь тенденция к более выраженной ERD в левом полушарии при абстрактных стимулах указывает на возможное подключение дополнительных когнитивных

механизмов, обусловленных необходимостью преобразования менее привычной сенсорной информации; однако статистически значимого вклада этого фактора на уровне выборки не выявлено.

Принципиально важным является обнаруженное расхождение между объективными нейрофизиологическими индикаторами и субъективной уверенностью испытуемых в успешности моторного воображения. Несмотря на чётко выраженные ERD-паттерны и высокую точность классификации сигналов с помощью пространственных фильтров и линейного дискриминантного анализа (CSP+LDA), самооценка участников у подавляющего большинства испытуемых не коррелирует с фактической эффективностью выполнения задачи. Данный результат указывает на ограниченные возможности сознательного контроля над процессами моторного воображения и подчёркивает критическую роль биологической обратной связи в контексте нейрореабилитации [22].

Практическая значимость выявленного несоответствия особенно актуальна для нейрореабилитации после инсульта или других повреждений центральной нервной системы, где моторное воображение применяется в качестве терапевтического подхода. Сопоставление объективных нейрофизиологических показателей (таких как ERD и результаты классификации) с субъективными оценками пациентов позволяет более точно адаптировать реабилитационные протоколы и минимизировать риск искажённой интерпретации динамики — как завышенной, так и заниженной. Например, если пациент убеждён в корректности воображаемого движения, но не демонстрирует соответствующего подавления сенсомоторного ритма, специалист может уточнить инструкцию, акцентируя внимание на телесной, а не визуальной составляющей образа. В противоположной ситуации, когда регистрируется положительная ERD-динамика при низкой субъективной уверенности, это может быть использовано как основа для дополнительной позитивной обратной связи и укрепления мотивации.

С практической точки зрения полученные данные подтверждают целесообразность дальнейшего развития ИМК с адаптивной

многоуровневой биологической обратной связью. Использование алгоритмов машинного обучения, способных в реальном времени анализировать нейрофизиологические сигналы и учитывать индивидуальные особенности пользователя, позволит формировать визуальные и тактильные сигналы обратной связи, компенсируя расхождение между субъективной самооценкой и объективным состоянием, что способствует повышению эффективности реабилитационного процесса.

Полученные результаты подчёркивают необходимость комплексного подхода к оценке моторного воображения, предполагающего интеграцию нейрофизиологических показателей с субъективными оценками. В дальнейшем особое внимание должно быть уделено исследованию механизмов когнитивного осознания моторных представлений, а также разработке подходов, способных компенсировать выявленное рассогласование между субъективным опытом и нейронной активностью. Решение этих задач имеет ключевое значение для развития персонализированных подходов в нейрореабилитации и совершенствования ИМК нового поколения.

Выводы

Полученные результаты демонстрируют, что латеральность воображаемого движения является основным фактором, определяющим выраженность сенсомоторной десинхронизации, тогда как форма визуального стимула оказывает лишь незначительное влияние. Результаты также выявили несоответствие между

нейрофизиологическими индикаторами и субъективной уверенностью участников в успешности моторного воображения, что указывает на ограниченность осознанного контроля над этим процессом. Такое рассогласование подчёркивает важность включения объективной биологической обратной связи в протоколы нейрореабилитации, особенно в условиях восстановления после инсульта и других поражений ЦНС. Применение адаптивных интерфейсов мозг-компьютер, использующих алгоритмы машинного обучения для индивидуализации обратной связи на основе анализа нейросигналов, представляется перспективным направлением. Таким образом, результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к оценке моторного воображения, сочетающего нейрофизиологические и субъективные данные, и подчёркивают значимость дальнейших исследований в области когнитивного осознания моторных актов для развития персонализированных реабилитационных технологий и ИМК-систем нового поколения.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Минздрава России в рамках научного проекта «Разработка программно-аппаратного комплекса для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями различной природы на основе мультимодальной биологической обратной связи» № 123020600127-4 (2023–2025 гг.)

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Feigin VL, et al. World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *International Journal of Stroke*. 2025; 20(2): 132-144. doi: 10.1177/17474930241308142.
2. Мокиенко О.А., Супонева Н.А., Азиатская Г.А. Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности. Клинические рекомендации / Под ред. О.А. Мокиенко, Н.А. Супоновой. — М.: МЕДпресс-Информ, 2018. — С.222. [Mokienko OA, Suponeva GA, Aziatskaya GA. Insul't u vzroslyh: central'nyj parez verhnjej konechnosti. Klinicheskie rekomendacii. O.A. Mokienko, N.A. Suponeva, editors. M.: MEDpress-Inform. 2018: 222. (In Russ.)]
3. Joundi RA, et al. Magnitude and time-course of dementia risk in stroke survivors: a population-wide matched cohort study. *Neurology*. 2025; 104(1): e210131. doi: 10.1212/WNL.0000000000210131.
4. Wood GK, Moore DR, Moon EH, et al. Posthospitalization COVID-19 cognitive deficits at 1 year are global and associated with elevated brain injury markers and gray matter volume reduction. *Nature Medicine*. 2025; 31(1): 245-257. doi: 10.1038/s41591-024-03309-8.

5. Пирадов М.А., Черникова А.С., Супонева Н.А. и др. Перспективы развития роботизированных устройств для восстановления движений руки // Роботические технологии в медицине. — 2016. — С.122-130. [Piradov MA, Chernikova NA, Suponeva AS, et. al. Perspektivy razvitiya robotizirovannyh ustrojstv dlya vosstanovleniya dvizhenij ruki. Roboticheskie tekhnologii v medicine. 2016: 122-130. (In Russ.)]
6. Khorev V, Kurkin S, Badarin A, et al. Review on the use of brain computer interface rehabilitation methods for treating mental and neurological conditions. *Journal of Integrative Neuroscience*. 2024; 23(7): 125. doi: 10.31083/j.jin2307125.
7. Hramov AE, Maksimenko VA, Pisarchik AN. Physical principles of brain-computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states. *Physics Reports*. 2021; 918: 1-133. doi: 10.1016/j.physrep.2021.03.002.
8. Фролов А.А., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х. и др. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки // Вестник Российского государственного медицинского университета. — 2016. — №2. — С.17-2. [Frolov AA, Mokienko OA, Lyukmanov RH, et. al. Predvaritel'nye rezul'taty kontroliruemogo issledovaniya effektivnosti tekhnologii IMK-ekzoskelet pri postinsul'tnom pareze ruki. Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta. 2016; 2: 17-2. (In Russ.)]
9. Фролов А.А., Черникова Л.А., Люкманов Р.Х. и др. Использование медицинской технологии «Неинвазивный интерфейс мозг — компьютер — экзоскелет кисти». Методические рекомендации. 2016. [Frolov AA, Chernikova LA, Lyukmanov RH, et. al. Ispol'zovanie medicinskoj tekhnologii «Neinvazivnyj interfejs mozg — komp'yuter — ekzoskelet kisti». Metodicheskie rekomendacii. 2016. (In Russ.)]
10. Huang G, Zhao Z, Zhang S, et al. Discrepancy between inter-and intra-subject variability in EEG-based motor imagery brain-computer interface: Evidence from multiple perspectives. *Frontiers in Neuroscience*. 2023; 17: 1122661. doi: 10.3389/fnins.2023.1122661.
11. Фролов А.А., Азиатская Г.А., Бобров П.Д. и др. Электрофизиологическая активность мозга при управлении интерфейсом мозг-компьютер, основанным на воображении движения // Физиология человека. — 2017. — №43(5). — С.17-25. [Frolov AA, Aziatskaya GA, Bobrov PD, et. al. Elektrofiziologicheskaya aktivnost' mozga pri upravlenii interfejsom mozg-komp'yuter, osnovannym na voobrazhenii dvizheniya. Fiziologiya cheloveka. 2017; 43(5): 17-25. (In Russ.)]
12. Yang B, Rong F, Xie Y, et al. A multi-day and high-quality EEG dataset for motor imagery brain-computer interface. *Scientific Data*. 2025; 12(1): 488. doi: 10.1038/s41597-025-04826-y.

13. Антипов В.М., Бадарин А.А., Куркин С.А. и др. Программно-аппаратный комплекс для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями // Врач и информационные технологии. — 2024. — №16(4). — С.38-47. doi: 10.25881/18110193_2024_4_38. [Antipov VM, Badarin AA, Kurkin SA, et al. Program-apparatus complex for rehabilitation of patients with cognitive and motor disorders. *Vrach i informatsionnye tekhnologii*. 2024; 16(4): 38-47. doi: 10.25881/18110193_2024_4_38. (In Russ.)]
14. Rimbart S, Gayraud N, Bougrain L, et al. Can a subjective questionnaire be used as brain-computer interface performance predictor?. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2019; 12: 529. doi: 10.3389/fnhum.2018.00529.
15. Ulloa ER, Pineda JA. Recognition of point-light biological motion: mu rhythms and mirror neuron activity. *Behavioural Brain Research*. 2007; 183(2): 188-94. doi: 10.1016/j.bbr.2007.06.007.
16. Bauer R, Gharabaghi A. Estimating cognitive load during self-regulation of brain activity and neurofeedback with therapeutic brain-computer interfaces. *Frontiers in behavioral neuroscience*. 2015; 9: 21. doi: 10.3389/fnbeh.2015.00021.
17. Jochumsen M, Roving C, Roving H, et al. Quantification of movement-related EEG correlates associated with motor training: A study on movement-related cortical potentials and sensorimotor rhythms. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017; 11: 604. doi: 10.3389/fnhum.2017.00604.
18. Daeglau M, Zich C, Welzel J, et al. Event-related desynchronization in motor imagery with EEG neurofeedback in the context of declarative interference and sleep. *NeuroImage: Reports*. 2021; 1(4): 100058. doi: 10.1016/j.ynirp.2021.100058.
18. Hramov AE, Koronovskii AA, Makarov VA, et al. *Wavelets in neuroscience*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015. doi: 10.1007/978-3-662-43850-3.
20. Rich TL, Gillick BT. Electrode placement in transcranial direct current stimulation—how reliable is the determination of C3/C4?. *Brain Sciences*. 2019; 9(3): 69. doi: 10.3390/brainsci9030069.
21. Zhuang M, Wu Q, Wan F, Hu Y. State-of-the-art non-invasive brain-computer interface for neural rehabilitation: A review. *Journal of Neurorestoratology*. 2020; 8(1): 12-25. doi: 10.26599/JNR.2020.9040001.
22. Maksimenko VA, Hramov AE, Grubov VV, et al. Nonlinear effect of biological feedback on brain attentional state. *Nonlinear Dynamics*. 2019; 95(3): 1923-1939. doi: 10.1007/s11071-018-4668-1.