

УДК 612.8:004.5:159.9
EDN: PУKXWD
<https://doi.org/10.15275/ssmj2104446>

Оригинальная статья

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКА МОТОРНОГО ВООБРАЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕРФЕЙСА «МОЗГ – КОМПЬЮТЕР» С МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А.А. Бадарин¹, В.М. Антипов¹, О.В. Пилюгин², М.Ю. Новиков¹, А.Р. Киселев¹, О.М. Драпкина¹

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины» Минздрава России, Москва, Россия

²ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта», Калининград, Россия

DYNAMICS OF MOTOR IMAGERY SKILL FORMATION USING A BRAIN – COMPUTER INTERFACE WITH MULTIMODAL FEEDBACK

A.A. Badarin¹, V.M. Antipov¹, O.V. Piljugin², M.Yu. Novikov¹, A.R. Kiselev¹, O.M. Drapkina¹

¹National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Для цитирования: Бадарин А.А., Антипов В.М., Пилюгин О.В., Новиков М.Ю., Киселев А.Р., Драпкина О.М. Динамика формирования навыка моторного воображения при использовании интерфейса «мозг – компьютер» с мультимодальной обратной связью. Саратовский научно-медицинский журнал. 2025; 21 (4): 446–449. EDN: PУKXWD. <https://doi.org/10.15275/ssmj2104446>.

Аннотация. *Цель:* оценить динамику формирования навыка моторного воображения при использовании интерфейса «мозг – компьютер» с визуальной и вибротактильной биологической обратной связью. *Материал и методы.* В пилотное исследование включены 10 здоровых добровольцев 29–34-летнего возраста. Все испытуемые были правши. В рамках 5-дневного протокола использовались 2 канала обратной связи: визуальный и вибротактильный. Детектирование моментов воображаемых движений осуществлялось в режиме реального времени с использованием классификатора на основе анализа паттернов электроэнцефалографической активности. Оценивалась успешность (доля) распознавания воображаемых движений левой и правой рук на протяжении 5 экспериментальных сессий. *Результаты.* Показано, что обучение характеризуется U-образной траекторией: после кратковременного снижения успешности в середине тренировок (с исходных 76 и 80% до 66 и 71% для правой и левой рук соответственно) показатели значительно возрастают к 4–5-й сессиям, достигая максимальных значений за весь период эксперимента (примерно 85 и 90% соответственно), что отражает формирование устойчивых нейронных паттернов. *Заключение.* Динамика формирования навыка моторного воображения при использовании интерфейса «мозг – компьютер» с визуальной и вибротактильной биологической обратной связью характеризуется U-образной траекторией с достижением максимальных значений к 5-му дню обучения.

Ключевые слова: интерфейс «мозг – компьютер», воображаемое движение, навык моторного воображения, биологическая обратная связь

For citation: Badarin AA, Antipov VM, Piljugin OV, Novikov MYu, Kiselev AR, Drapkina OM. Dynamics of motor imagery skill formation using a brain – computer interface with multimodal feedback. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2025; 21 (4): 446–449. (In Russ.) EDN: PУKXWD. <https://doi.org/10.15275/ssmj2104446>.

Abstract. *Objective:* to study the dynamics of motor imagery skill acquisition during the use of a brain – computer interface providing visual and vibrotactile biofeedback. *Material and methods.* The pilot study included 10 healthy volunteers aged 29–34 years. All subjects were right-handed. Within a five-day protocol, two feedback channels were used: visual and vibrotactile. Detection of moments of imagined movements was performed in real time using a classifier based on the analysis of EEG activity patterns. The success rate (proportion) of recognizing imagined movements of the left and right hand was assessed over the course of five experimental sessions. *Results.* It has been shown that learning is characterized by a U-shaped trajectory: after a short-term decrease in success rate in the middle of the training sessions (from initial values of 76 and 80% to 66 and 71% for the right and left hand, respectively), the performance significantly improves by the 4–5th session, reaching the maximum values for the entire experimental period (approximately 85 and 90%, respectively). This reflects the formation of stable neural patterns. *Conclusion.* The formation of motor imagery skill using a brain – computer interface with visual and vibrotactile feedback follows a U-shaped trajectory, peaking on day 5 of training.

Keywords: brain – computer interface, motor imagery, motor imagery skill, biofeedback

Введение. В настоящее время возникающие вследствие патологий центральной нервной системы когнитивные и моторные нарушения являются значимой проблемой в области здравоохранения и приводят к ухудшению трудоспособности и качества жизни пациентов [1, 2]. Перспективным направлением профилактики и терапии подобных нарушений является использование технологии ИМК – интерфейсов «мозг – компьютер» (или прямой нейронный интерфейс, мозговой интерфейс), адаптирующей процесс реабилитации с учетом индивидуальных особенностей человека. Один из вариантов ключевого элемента реализации подобных реабилитационных ИМК – осуществление воображаемых движений, задействующих нейронные сети, ассоциированных с осуществлением сенсомоторных и когнитивных функций, но не требующих физических движений. Такой подход способствует нейропластичности головного мозга и особенно эффективен в начальный период реабилитации, когда выполнение реальных движений для пациента может быть затруднительным или невозможным [3–5]. Биологическая обратная связь в данном случае направлена на развитие саморегуляции у пациентов [6, 7]. Так, взаимодействуя с программно-аппаратным комплексом, пациент учится осознанно воспроизводить паттерны мозговой активности, направленные на управление ИМК. Это особенно важно в рамках реабилитационных мероприятий, поскольку развитие таких навыков требует наряду с формированием моторной реакции и понимания собственного ментального состояния. Расхождение между объективными показателями моторной активности и субъективным состоянием может свидетельствовать о недостаточном осознанном контроле восстанавливаемых функций, и анализ связей между объективным и субъективным состояниями пациентов представляет интерес в рамках совершенствования программ реабилитации их когнитивных и моторных нарушений с использованием ИМК [3].

Ранее нами была разработана новая технология, воплощенная в виде прототипа реабилитационного программно-аппаратного комплекса с ИМК, использующая воображаемые движения в составе визуальной и вибротактильной биологической обратной связи для задач коррекции различных когнитивных и моторных нарушений [3, 8]. Однако вопросы формирования навыков моторного воображения у пациентов в контексте их вовлечения в интерактивную реабилитацию на основе ИМК остаются недостаточно изученными, в то время как это может являться важным лимитирующим фактором для клинической эффективности.

Цель – оценить динамику формирования навыка моторного воображения при использовании ИМК с визуальной и вибротактильной биологической обратной связью.

Материал и методы. Исследование проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации и получило одобрение независимого этического комитета ФГБУ «НМИЦ терапии и профилактической медицины» Минздрава России (выписка из протокола 06-05/25 от 15.10.2025). Информированное согласие получено от всех участников исследования.

В пилотное исследование включены 10 здоровых добровольцев в возрасте 29–34 лет. Все участвующие испытуемые были правшами.

Проведен многодневный эксперимент, направленный на оценку динамики формирования навыков воображаемых движений при регулярной тренировке в условиях мультимодальной биологической обратной связи. В рамках протокола использовали 2 канала обратной связи: визуальный и вибротактильный. Визуальная обратная связь представлена анимацией сгибающейся ладони на экране, активируемой при успешном распознавании движения. Вибротактильная обратная связь осуществлялась с помощью вибростимулятора, расположенного на ладони соответствующей руки испытуемого. Такое сочетание модальностей способствовало более эффективной интеграции сенсорных потоков и усилению нейронного представления воображаемого движения, что, в свою очередь, поддерживало формирование устойчивых моторных образов и сохраняло активное участие испытуемого на протяжении каждой сессии. Эксперимент длился 5 дней, и в каждом из них проводили 1 реабилитационную сессию, включавшую задания на воображение движений левой и правой рук. Такой дизайн позволил проследить постепенную адаптацию к условиям тренировки, стабилизацию стратегий выполнения задания и изменение качества генерируемых моторных образов на протяжении всего периода наблюдения.

Регистрацию электроэнцефалограмм (ЭЭГ) производили на протяжении всей экспериментальной сессии. Детектирование моментов воображаемых движений осуществляли в режиме реального времени с использованием классификатора на основе анализа паттернов ЭЭГ-активности, описанных в наших предшествующих работах [3].

Перед началом эксперимента выполняли калибровку глазодвигательной активности и запись фоновой ЭЭГ в течение 60 сек. Затем испытуемый адаптировался к распознаванию воображаемых движений, мысленно выполняя сжатие ладоней соответствующей руки. Эксперимент включал задания на воображение движений обеих рук. Основная часть эксперимента включала мысленное выполнение движений, при успешном распознавании которых предъявлялась биологическая обратная связь (визуальная и/или вибротактильная). Общая продолжительность 1 сессии составляла приблизительно 30 мин.

При обработке экспериментальных данных оценивали успешность распознавания воображаемых движений левой и правой рук на протяжении 5 экспериментальных сессий. Успешность отражала долю эффективно выполненных проб воображения, где каждая из них представляла собой 10-секундный интервал, в течение которого испытуемый должен был сформировать устойчивый моторный образ движения заданной руки. Если воображаемое действие достигало необходимого уровня выраженности и соответствовало целевому ЭЭГ-паттерну, то алгоритм классификации фиксировал успешное распознавание.

Для оценки влияния фактора экспериментальной сессии на успешность распознавания воображаемых движений применялся дисперсионный анализ с повторными измерениями (repeated measures ANalysis Of VAriance – RM ANOVA) отдельно для каждой руки, размер эффекта оценивали с помощью частичной эти-квадрат (η^2). Уровень статистической значимости был установлен как $p < 0,05$.

Данные представлены в виде среднего значения и его стандартной ошибки.

Результаты. На рисунке представлена динамика успешности распознавания воображаемых движений левой и правой рук на протяжении 5 экспериментальных сессий. RM ANOVA выявил статистически значимое влияние фактора сессии на успешность распознавания воображаемых движений как для правой руки ($p=0,003$, $\eta_p^2=0,35$), так и для левой руки ($p<0,001$, $\eta_p^2=0,41$). Динамика успешности распознавания воображаемых движений показывает четкую U-образную траекторию обучения для обеих рук. В 1-й сессии показатели успешности распознавания воображаемых движений находятся на достаточно высоком уровне: примерно 80% для правой руки и приблизительно 76% – для левой. Ко 2-й сессии успешность распознавания воображаемых движений несколько снижается, а к 3-й достигает минимальных значений: примерно 71% для правой руки и приблизительно 66% – для левой. С 4-й сессии успешность распознавания воображаемых движений начинает постепенно восстанавливаться. Однако наиболее выраженный рост наблюдается между 4-й и 5-й сессиями: успешность распознавания воображаемых движений правой руки увеличивается более чем на 10%, а левой – почти на 20%, достигая максимальных значений за весь период эксперимента (приблизительно 85 и 90% соответственно).

Обсуждение. Эффект «провисания» точности распознавания воображаемых движений в середине эксперимента является типичным в обучающих протоколах и отражает адаптационный этап, когда испытуемый перестраивает внутреннюю стратегию формирования моторного образа. На этом этапе человек переходит от более поверхностного интуитивного воображения к более структурированному специфичному моторному образу, что временно снижает стабильность выполнения задачи. Это утверждение согласуется с данными исследований, в которых показано, что обучение управлению ИМК – навык, требующий практики и адаптации, а перестройка нейронных паттернов может влиять на стабильность сигнала [9, 10].

Повышение успешности с 4-го дня эксперимента отражает формирование устойчивых воспроизводимых нейронных паттернов, соответствующих воображаемым движениям, и улучшение согласованности между моторным образом и алгоритмом его распознавания. Долгосрочные тренировки с биологической обратной связью действительно способствуют

формированию таких устойчивых навыков саморегуляции [11, 12].

Интересен выраженный асимметричный эффект между руками. В течение первых 4 сессий успешность воображения правой руки стабильно выше, что было ожидаемо, поскольку испытуемые были правшами; моторные представления правой руки более привычны и хорошо закреплены нейронно. Это подтверждается исследованиями, демонстрирующими, что у правшей двигательные представления правой (доминантной) руки вызывают более сильную и латерализованную активацию сенсомоторных ритмов, что теоретически может облегчать их распознавание [13]. Однако к 5-й сессии ситуация меняется – успешность левой руки становится выше, чем правой. Возможно, это характеризует компенсационный эффект: испытуемый, замечая, что воображение движений левой руки дается труднее, начинает уделять ей больше внимания и усилий. Такая перераспределенная концентрация и повышенный контроль приводят к резкому росту успешности распознавания воображаемых движений именно по линии левой руки.

Таким образом, полученные данные демонстрируют характерную для процесса обучения траекторию: начальный высокий уровень, затем снижение в период перестройки стратегии и последующее значительное улучшение качества выполнения задания. Показатели 5-й сессии подтверждают, что многодневный тренировочный протокол эффективно способствует укреплению навыков моторного воображения, стабилизации нейронных представлений и улучшению взаимодействия между пользователем и системой распознавания.

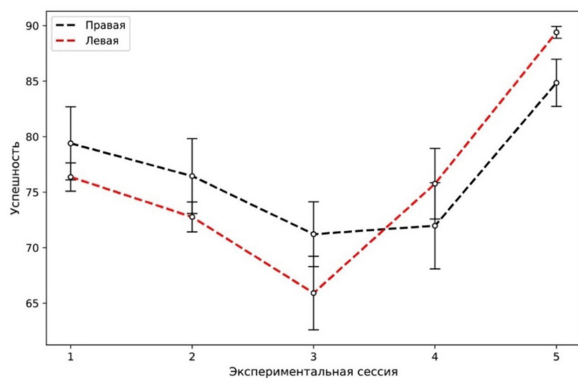
Заключение. Динамика формирования навыка моторного воображения при использовании ИМК с визуальной и вибротактильной биологической обратной связью характеризуется U-образной траекторией с достижением максимальных значений к 5-му дню обучения. Проведенное исследование продемонстрировало эффективность многодневного (в нашем случае – 5-дневного) тренировочного протокола с мультимодальной биологической обратной связью для формирования устойчивого навыка моторного воображения. Выявленная динамика обучения отражает закономерный процесс адаптации и перестройки когнитивных стратегий испытуемых. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации реабилитационных протоколов на основе ИМК, в частности для определения минимально необходимой длительности тренировочного курса и прогнозирования динамики восстановления пациентов.

Вклад авторов. Авторы внесли эквивалентный вклад в написание статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках научной работы «Разработка программно-аппаратного комплекса для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями различной природы на основе мультимодальной биологической обратной связи», выполняемой в ФГБУ «НМИЦ терапии и профилактической медицины» Минздрава России в соответствии с государственным заданием Минздрава России №123020600127-4 (2023–2025 гг.).

Информированное согласие на публикацию. Пациенты подписали форму добровольного информированного согласия на публикацию медицинской информации.



Зависимость успешности распознавания воображаемых движений левой и правой рук в ходе 5 дней экспериментальных сессий

Соответствие принципам этики. Протокол исследования одобрен независимым этическим комитетом ФГБУ «НИИЦ терапии и профилактической медицины» Минздрава России (выписка из протокола 06-05/25 от 15.10.2025). Одобрение и процедуру проведения протокола получали по принципам Хельсинкской декларации.

References (Список источников)

1. Feigin VL, Brainin M, Norrving B, et al. World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *Int J Stroke*. 2025;20(2):132-44. DOI:10.1177/17474930241308142
2. Mokienko OA, Suponeva NA, Aziatskaya GA. Stroke in adults: Central paresis of the upper limb. Clinical guidelines. Ed. by O.A. Mokienko, N.A. Suponeva. Moscow: MEDpress-Inform, 2018; 108 p. (In Russ.) 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; 108 с.
3. Antipov VM, Smirnov NM, Badarin AA, et al. Using brain – computer interfaces for personalized neurorehabilitation: The role of subjective perception and neurophysiological indicators. *Medical doctor and information technology*. 2025;(2):84-97. (In Russ.) Антипов В.М., Смирнов Н.М., Бадарин А.А. и др. 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
4. Khorev V, Kurkin S, Badarin A, et al. Review on the use of brain computer interface rehabilitation methods for treating mental and neurological conditions. *J Integr Neurosci*. 2024;23(7):125. DOI: 10.31083/j.jin2307125
5. 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
6. Ulloa ER, Pineda JA. Recognition of point-light biological motion: Mu rhythms and mirror neuron activity. *Behav Brain Res*. 2007;183(2):188-94. DOI:10.1016/j.bbr.2007.06.007
7. Bauer R, Gharabaghi A. Estimating cognitive load during self-regulation of brain activity and neurofeedback with therapeutic brain – computer interfaces. *Front Behav Neurosci*. 2015;9:21. DOI:10.3389/fnbeh.2015.00021
8. Antipov VM, Badarin AA, Kurkin SA, et al. Hardware-software complex for rehabilitation of patients with cognitive and motor disorders. *Medical Doctor and Information Technology*. 2024;(4):38-47. (In Russ.) 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;(4):38-47. DOI:10.25881/18110193_2024_4_38
9. Allison BZ, Neuper C. Could anyone use a BCI? In: *Brain – computer interfaces*. Human-Computer Interaction Series. London: Springer, 2010; p. 35-54. DOI:10.1007/978-1-84996-272-8_3
10. Finniss R, Mehmood A, Holle H, Iqbal J. Exploring imagined movement for brain – computer interface control: An fNIRS and EEG Review. *Brain Sci*. 2025;15(9):1013. DOI:10.3390/brainsci15091013
11. Zich C, Vos MD, Kranczioch C, Debener S. Wireless EEG with individualized channel layout enables efficient motor imagery training. *Clin Neurophysiol*. 2015;126(4):698-710. DOI:10.1016/j.clinph.2014.07.007
12. Naros G, Naros I, Grimm F, et al. Reinforcement learning of self-regulated sensorimotor β -oscillations improves motor performance. *NeuroImage*. 2016;134:142-52. DOI:10.1016/j.neuroimage.2016.03.016
13. Zapala D, Iwanowicz P, Francuz P, Augustynowicz P. Handedness effects on motor imagery during kinesthetic and visual-motor conditions. *Sci Rep*. 2021;11(1):13112. DOI:10.1038/s41598-021-92467-7

Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 20.11.2025. The article was submitted 17.10.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 20.11.2025.

Информация об авторах:

Артём Александрович Бадарин – старший научный сотрудник центра координации фундаментальной научной деятельности, кандидат физико-математических наук, Badarin.a.a@mail.ru, ORCID 0000-0002-3212-5890; **Владимир Михайлович Антипов** – эксперт центра координации фундаментальной научной деятельности, кандидат физико-математических наук, vantipovm@gmail.com, ORCID 0009-0003-9612-0305; **Олег Владимирович Пилюгин** – лаборант-исследователь Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, ovplgn@gmail.com, ORCID 0000-0001-8998-0217; **Новиков Михаил Юрьевич** – младший научный сотрудник центра координации фундаментальной научной деятельности, mynder@mail.ru, ORCID 0000-0002-0876-7201; **Антон Робертович Киселев** – руководитель центра координации фундаментальной научной деятельности, профессор, доктор медицинских наук, kiselev@gnicpm.ru, ORCID 0000-0003-3967-3950; **Оксана Михайловна Драпкина** – директор, профессор, доктор медицинских наук, академик РАН, drapkina@bk.ru, ORCID 0000-0002-4453-8430.

Information about the authors:

Artem A. Badarin – Senior Researcher of the Coordinating Center for Fundamental Research, PhD, Badarin.a.a@mail.ru, ORCID 0000-0002-3212-5890; **Vladimir M. Antipov** – Expert of the Coordinating Center for Fundamental Research, PhD, vantipovm@gmail.com, ORCID 0009-0003-9612-0305; **Oleg V. Pilugin** – Research Assistant of the Baltic Center for Neurotechnologies and Artificial Intelligence, ovplgn@gmail.com, ORCID 0000-0001-8998-0217; **Mikhail Yu. Novikov** – Junior Researcher of the Coordinating Center for Fundamental Research, mynder@mail.ru, ORCID 0000-0002-0876-7201; **Anton R. Kiselev** – Head of the Coordinating Center for Fundamental Research, Professor, DSc, kiselev@gnicpm.ru, ORCID 0000-0003-3967-3950; **Oksana M. Drapkina** – Director, Professor, DSc, Academician of the Russian Academy of Sciences, drapkina@bk.ru, ORCID 0000-0002-4453-8430.