

КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ
КОНФЕРЕНЦИИ
2025

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман

**КОГНИТИВНАЯ НАУКА В МОСКВЕ
НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**МАТЕРИАЛЫ
КОНФЕРЕНЦИИ
2025**

**ПОД РЕДАКЦИЕЙ Е.В. ПЕЧЕНКОВОЙ,
М.В. ФАЛИКМАН, А.Я. КОЙФМАН**

Москва
БукиВеди, Московский институт психоанализа
2025

УДК 159.9
ББК 88.25
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 25–26 июня 2025. Под ред. Е. В. Печенковой, М. В. Фаликман, А. Я. Койфман. – М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа. 2025 г. – 668 стр.

© Авторы статей, 2025

ISBN 978-5-4465-4437-0

УДК 159.9
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-4437-0

© Авторы статей, 2025

КВАЗИДВИЖЕНИЯ В ИНТЕРФЕЙСЕ ГЛАЗ – МОЗГ – КОМПЬЮТЕР: НОВАЯ СТРАТЕГИЯ СЕНСОМОТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Ю. Г. Шевцова* (1, 2), А. С. Яшин (2, 3), Е. П. Свирин (2), А. Н. Васильев (1, 2),
С. Л. Шишкин (2)

shevtsova.jg@gmail.com

1 – Кафедра физиологии человека и животных, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва;

2 – МЭГ-центр, Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва;

3 – НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Аннотация. В исследовании впервые был реализован интерфейс глаз – мозг – компьютер (ИГМК), основанный на квазидвижениях (КД) – попытках движения без мышечной активации. КД рассматривались как альтернатива представлению движений (ПД), традиционно применяемому в активных ИМК. ПД представляет собой внутренне ориентированную задачу, что может ограничивать ее совместимость с ИГМК, где требуется постоянное визуальное внимание. КД, напротив, является более внешней задачей и потенциально лучше сочетается с управлением в визуально насыщенной среде. Разработанная игра *AstroSync* позволила смоделировать такую ситуацию, требуя точной синхронизации начала и завершения сенсомоторной задачи с визуальными стимулами. В эксперименте мы сравнили взаимодействие с игрой с помощью ПД и КД, распознаваемых индивидуально настроенными моделями ЭЭГ-классификаторов. Испытуемые успешно справились с управлением в обоих режимах. Однако 11 из 18 участников предпочли ПД, указывая на субъективную сложность КД и необходимость повышенного внимания к выполнению этой задачи. В то же время наблюдалась тенденция к снижению внимания к амплитуде движения по мере накопления опыта управления в режиме с КД, что может свидетельствовать о потенциале автоматизации КД при длительном тренинге. Результаты подтверждают применимость КД в ИГМК и подчеркивают важность оптимизации инструкций и обратной связи для повышения удобства и эффективности управления.

Ключевые слова: квазидвижения, представления движений, сенсомоторные задачи, интерфейс мозг – компьютер, интерфейс глаз – мозг – компьютер

Исследование поддержано грантом № 22-19-00528 Российского научного фонда.

Введение

Интерфейсы мозг – компьютер (ИМК) позволяют управлять внешними устройствами на основе мозговой активности и широко применяются в ассистивных и реабилитационных технологиях. В качестве управляющей

команды, распознаваемой с хорошим временным разрешением с помощью ЭЭГ, как правило, используется представление движений (ПД) – мысленное воспроизведение образа движения без его физической реализации (Pfurtscheller, Neuper, 2001). Для расширения функциональности разрабатываются гибридные ИМК с добавлением управления взглядом, формируя интерфейс глаз – мозг – компьютер (ИГМК) (Reddy et al., 2024). Однако представление движений, будучи внутренне ориентированной задачей, может конкурировать за ресурсы внимания с внешними компонентами взаимодействия (Walcher et al., 2023) – управлением и мониторингом визуальных событий на экране. Альтернативным подходом являются попытки движения, то есть внешне ориентированные задачи, демонстрирующие более устойчивые ЭЭГ-паттерны (Mansour et al., 2022) и успешно реализованные в ИГМК (Oxley et al., 2021). У здоровых участников такие попытки моделируются квазидвижениями (КД) – действиями, минимизированными до отсутствия мышечной активности (Nikulin et al., 2008).

Применение КД в ИГМК ранее не исследовалось. Целью этого исследования стало изучение возможности использования КД в качестве управляющей команды в ИГМК и их сравнение с классическим методом – управлением посредством ПД.

Методика

В исследовании сравнивались в контексте управления ИМК два типа сенсоромоторных (СМ) задач: представление движений (ПД) и квазидвижения (КД); движением было отведение большого пальца правой руки. При ПД испытуемые были проинструктированы мысленно воспроизводить кинестетические ощущения движения, избегая его зрительного образа. Обучение КД включало поэтапное снижение амплитуды движения под контролем электромиограммы (ЭМГ) с переходом к попыткам движения без мышечного сокращения, при этом инструкция была фокусироваться на подаче моторной команды, а не на телесных ощущениях.

Дизайн игры. Игра *AstroSync* была разработана для комбинированного управления взглядом и ИМК. Игровое поле состояло из 10 созвездий, включающих центральную звезду и мини-звезды вокруг (рис. 1а). При удержании взгляда на звезде в течение 0.5 с созвездие очерчивалось окружностью, а еще через 1.5 с звезда выделялась желтым цветом (рис. 1б), сигнализируя игроку о начале периода управления с помощью ИМК. Каждую секунду активировалась одна из 8 кольцевых невидимых игроку зон, от центра к краю. Мини-звезды в этих кольцах подсвечивались зеленым и приносили победные очки, если классификатор распознавал выполнение СМ задачи по ЭЭГ-паттернам, в противном случае – красным, а очки вычитались (рис. 1с). Преждевременное начало СМ задачи приводило к блокировке взаимодействия: звезда исчезала, и игроку предлагалось отвлекающее задание на подсчет мини-звезд в появляющихся фигурах (рис. 1д). Окончание выполнения СМ задачи после заполнения окружности штрафовалось вычитанием очков во внешних кольцах (до 4-х дополнительных колец).

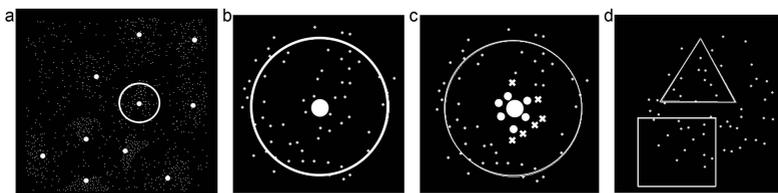


Рисунок 1. Игровое взаимодействие в *AstroSync*: а) игровое поле с выделенным созвездием; б) сигнал (выделение звезды желтым) к началу выполнения СМ задачи; в) обратная связь на взаимодействие со звездой (крестики – красный цвет; кружки – зеленый цвет); д) блокировка взаимодействия

Регистрация данных и классификация. Положение взгляда записывалось с частотой 500 Гц (EyeLink 1000 Plus, SR Research), а ЭЭГ (64 канала) и ЭМГ – с частотой 1000 Гц (NVX136, МКС). Распознавание выполнения СМ задачи осуществлялось с частотой 10 Гц индивидуально построенными классификаторами, использующими пространственно-частотные признаки ЭЭГ-сигнала (Vasilyev et al., 2021). Они были обучены на данных в калибровочной сессии без обратной связи, где испытуемые по сигналу выполняли СМ задачу или задачу на счет мини-звезд в фигурах. В последующих играх модели обучались заново с использованием новых данных для учета нестационарности сигнала.

Дизайн эксперимента. Эксперимент состоял из двух блоков (ПД и КД), каждый включал обучение, калибровку и три игры (всего ~3 часа). После калибровки, первой и последней игр испытуемые проходили опрос на качество управления ИГМК, а в конце 2-го блока – на сравнение режимов.

Выборка и оценка режимов управления. Анализировались данные от 18 здоровых испытуемых (19–41 лет, медиана – 24); все имели опыт с ПД, девять – с КД в предыдущих экспериментах. Мы оценивали отдельно три этапа взаимодействия с созвездием: фазу инициации (среднее количество блокировок на одну звезду), основную фазу (процент зеленых колец) и фазу завершения (среднее количество внешних штрафных поясов на одну звезду).

Результаты

Испытуемые успешно справлялись с управлением игрой при выполнении обоих типов СМ задач, как видно на рис. 2. При этом статистически значимых

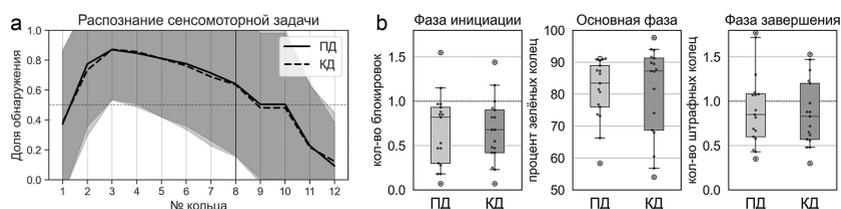


Рисунок 2. Результаты онлайн-управления ИГМК: а) распознавание СМ задачи онлайн-классификатором, тенью отмечен межквартильный размах (IQR); б) метрики эффективности управления в различных фазах взаимодействия с созвездием

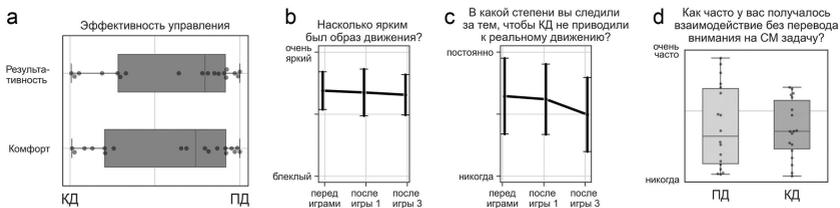


Рисунок 3. Результаты опросников: а) сравнение режимов; б) оценка уровня внимания к амплитуде при КД; в) оценка уровня яркости образа при ПД; г) показатель автоматизации выполнения СМ задач

различий между режимами на любом из этапов взаимодействия не выявлено (парный t -тест): фаза инициации – $t(17) = 0.078$, $p = .939$; основная фаза – $t(17) = 0.283$, $p = .78$; фаза завершения – $t(17) = 0.507$, $p = .619$.

Оценка результативности и комфортности управления (Wilcoxon test) не выявила значимых отклонений от нейтрального уровня: $W(17) = 61.0$, $p = .304$ и $W(17) = 66.0$, $p = .417$ соответственно (рис. 3а). При этом 7 из 18 участников предпочли КД, остальные – ПД, ссылаясь на необходимость контроля за переходом КД в полноценное движение (3) и общую сложность в понимании и выполнении задачи (7). Согласно однофакторной ANOVA, с ходом игр участники снижали внимание к амплитуде движения при выполнении КД (рис. 3с): $F(2, 34) = 3.301$, $p = .049$; post hoc: $p = .008$ («перед играми» vs «после игры 3»). Для ПД изменений в яркости образа не наблюдалось: $F(2, 34) = 0.747$, $p = .481$ (рис. 3б).

Испытуемые оценивали степень автоматизации управления, указывая, как часто удавалось взаимодействовать с созвездием без переключения внимания на СМ задачу (рис. 3д). Для КД зафиксировано значимое отклонение в сторону якоря «никогда» ($t(17) = -2.598$, $p = .019$); для ПД это отклонение незначимо ($t(17) = -1.584$, $p = .132$).

Обсуждение

Мы показали, что испытуемые могут успешно справляться с управлением ИГМК в игре *AstroSync* при выполнении обоих типов сенсомоторных (СМ) задач – представлении движения (ПД) и квазидвижения (КД). Управление посредством КД было реализовано впервые в ИМК-технологиях.

Предполагалось, что КД, как внешне ориентированная задача, будут обеспечивать более эффективное управление, чем внутренне направленные ПД. Однако различий в результативности между условиями выявлено не было. Возможным фактором является различие в опыте: все участники были знакомы с ПД, но лишь половина – с КД, при этом обновленная инструкция требовала повторного освоения задачи даже у опытных испытуемых.

11 из 18 испытуемых отдали предпочтение ПД, отмечая сложность КД как задачи. Вероятно, это связано с потерей чувства контроля у испытуемых из-за отсутствия соматосенсорной обратной связи в виде ощущения мышечного напряжения – фактора, ранее отмеченного в качестве причины повышенной вос-

принимаемой реальности КД по сравнению с ПД (Yashin, 2023). По-видимому, визуальная обратная связь не смогла компенсировать отсутствие сенсорных ощущений, что может быть связано как с ее неконгруэнтностью задаче, так и с задержкой подачи (1 с), обусловленной техническими ограничениями.

Результаты также показали, что выполнение СМ задач не автоматизировалось по прошествии трех игр — особенно при выполнении КД, требующих постоянного контроля над амплитудой движения. Однако снижение внимания к амплитуде КД к третьей игре (рис. 3с) указывает на возможную автоматизацию при более длительной тренировке.

Дизайн игры позволил взгляду одновременно выбирать объекты и отслеживать визуальные сигналы и обратную связь, что особенно критично в игре *AstroSync*, где игровой процесс требует синхронизации начала и завершения СМ задачи с сигналами на экране. В данном исследовании окончание взаимодействия определялось на основе классификации паттернов, связанных с десинхронизацией мю-ритма, однако в дальнейшем эту функцию можно реализовать через распознавание постдвигательной бета-синхронизации, показанной надежным маркером завершения моторной активности (Orset et al., 2021).

Таким образом, для повышения практической применимости КД необходима доработка методики обучения, исследование влияния обратной связи, а также изучение КД в режиме долгосрочных тренировок и клинические тесты. Полученные результаты подчеркивают актуальность дальнейшего изучения потенциала КД в задачах ИМК и ИГМК.

Литература

Mansour S., Ang K. K., Nair K. P. S., Phua K. S., Arvaneh M. Efficacy of brain – computer interface and the impact of its design characteristics on poststroke upper-limb rehabilitation: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials // *Clinical EEG and Neuroscience*. 2022. Vol. 53. No. 1. P. 79 – 90. <https://doi.org/10.1177/15500594211009065>

Nikulin V. V., Hohlefeld F. U., Jacobs A. M., Curio G. Quasi-movements: A novel motor – cognitive phenomenon // *Neuropsychologia*. 2008. Vol. 46. No. 2. P. 727 – 742. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.008>

Orset B., Lee K., Chavarriaga R., Millan J.d.R. User adaptation to closed-loop decoding of motor imagery termination // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2021. Vol. 68. No. 1. P. 3 – 10. <https://doi.org/10.1109/tbme.2020.3001981>

Oxley T. J., Yoo P. E., Rind G. S., Ronayne S. M., Lee C. M. S., Bird C., Hampshire V., Sharma R. P., Morokoff A., Williams D. L., MacIsaac C., Howard M. E., Irving L., Vrljic I., Williams C., John S. E., Weissenborn F., Dzenko M., Balabanski A. H., Friedenberg D., Burkitt A. N., Wong Y. T., Drummond K. J., Desmond P., Weber D., Denison T., Hochberg L. R., Mathers S., O'Brien T. J., May C. N., Mocco J., Grayden D. B., Campbell B. C. V., Mitchell P., Opie N. L. Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis: First in-human experience // *Journal of NeuroInterventional Surgery*. 2021. Vol. 13. No. 2. P. 102 – 108. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2020-016862>

Pfurtscheller G., Neuper C. Motor imagery and direct brain-computer communication // *Proceedings of the IEEE*. 2001. Vol. 89. No. 7. P. 1123 – 1134. <https://doi.org/10.1109/5.939829>

Reddy G. S. R., Proulx M. J., Hirshfield L., Ries A. J. Towards an eye-brain-computer interface: Combining gaze with the stimulus-preceding negativity for target selections in XR //

Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Cold Spring Harbor Laboratory, 2024. <https://doi.org/10.1101/2024.03.13.584609>

Vasilyev A. N., Nuzhdin Y. O., Kaplan A. Y. Does real-time feedback affect sensorimotor EEG patterns in routine motor imagery practice? // Brain Sciences. 2021. Vol. 11. No. 9:1234. <https://doi.org/10.3390/brainsci11091234>

Walcher S., Korda Z., Körner C., Benedek M. The effects of type and workload of internal tasks on voluntary saccades in a target-distractor saccade task // PLOS ONE. 2023. Vol. 18. No. 8. P. e0290322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290322>

Yashin A. S. A challenge for bringing a BCI closer to motor control: The “Interface uncanny valley” hypothesis // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Computational Technologies in Cognitive Science, Genomics and Biomedicine (CSGB). IEEE, 2023. P. 242 – 247. <https://doi.org/10.1109/csgeb60362.2023.10329830>

QUASI-MOVEMENTS IN AN EYE – BRAIN – COMPUTER INTERFACE: A NEW STRATEGY FOR SENSORIMOTOR INTERACTION

Y. G. Shevtsova* (1, 2), A. S. Yashin (2, 3), E. P. Svirin (2), A. N. Vasilyev (1, 2), S. L. Shishkin (2)

shevtsova.jg@gmail.com

1 – M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow;

2 – Moscow State University of Psychology and Education, Moscow;

3 – NRC “Kurchatov institute”, Moscow

Abstract. This study presents the first implementation of an eye – brain – computer interface (EBCI) based on quasi-movements (QMs)—a model of attempted movements without actual muscle activation. QMs were explored as an alternative to motor imagery (MI), which is traditionally used in active BCIs. While MI is an internally oriented task that may compete with the visual attention demands of EBCIs, QMs represent a more externally directed strategy potentially better suited for visually intensive environments. The custom-designed game AstroSync simulated such a setting by requiring precise synchronization of sensorimotor task onset and offset with visual cues. In the experiment, MI and QM were compared in terms of their effectiveness in interactions with “constellations” using individual EEG classifiers. Healthy participants successfully controlled the interface using both sensorimotor tasks. However, 11 of 18 participants preferred MI, citing the subjective difficulty of QMs and the increased attentional demands they imposed. Meanwhile, a decline in attentional focus on movement amplitude over repeated trials in the QM condition suggests a potential for task automation with extended training. These results confirm the feasibility of using QM in EBCI and highlight the importance of optimizing training protocols and feedback mechanisms to improve usability and control performance.

Keywords: quasi-movements, motor imagery, sensorimotor tasks, brain-computer interface, eye-brain-computer interface

Research supported by the Russian Science Foundation, Grant 22-19-00528.