

3. Friedrich E. V., Sivanathan A., Lim T. et al. An Effective Neurofeedback Intervention to Improve Social Interactions in Children with Autism Spectrum Disorder // J. Autism Dev. Disord. 2015. Vol. 45, no 12. P. 4084–4100.

Н. В. Сыров
А. А. Мирошников
Л. В. Яковлев
Н. Н. Шушарина
А. Я. Каплан

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Москва, Россия

Балтийский федеральный университет им. И. Канта
Калининград, Россия

Восприятие ошибок при управлении виртуальной рукой в контуре ИМК на волне П300

При изучении мозг-машинного взаимодействия важной является проблема восприятия оператором ошибок системы. Возникающие в контуре ИМК ошибки срабатывания могут анализироваться в мозгу не так, как если бы они совершались пользователем естественным образом. Изучение этого аспекта взаимодействия «человек — машина» поможет углубить понимание мозговых механизмов формирования навыка работы в контуре «мозг-компьютер» и создать надежные ИМК, в которых реализован алгоритм оценки мозговых реакций на ошибку и ее коррекции. В настоящей работе было проведено исследование ЭЭГ-коррелятов анализа ошибок в задаче управления виртуальной конечностью при помощи ИМК-П300. Было показано, что ошибки срабатывания ИМК отражаются не только в изменениях вызванных потенциалов ЭЭГ, но и в динамике амплитуды сенсомоторных ритмов. Полученные данные могут быть использованы для построения ИМК-парадигм с обнаружением и предотвращением ошибок на основании ЭЭГ-реакций оператора.

Ключевые слова: потенциал ошибки, ИМК, десинхронизация, обратная связь

Nikolay V. Syrov
Andrey A. Miroshnikov
Lev V. Yakovlev
Natalya N. Shusharina
Alexander Ya. Kaplan

Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Immanuel Kant Baltic Federal University
Kaliningrad, Russia

Perception of Errors During P300-BCI-Based Control of Virtual Hand Movements

The perception of errors is the important problem in the study of brain-machine interaction. Errors occurring in the BCI can be analyzed in the brain differently than error that were made by the user in a natural way. Studying this aspect of human-machine interaction will help to understand the skill formation mechanisms of working in the brain-computer loop and create reliable BCIs with algorithms for assessing brain responses to errors and correction of them. In this work, we studied the error-related EEG changes during P300-BCI-based control of virtual hand movements. The results demonstrated that the analysis of errors is reflected not only in changes in the evoked potentials, but also in the dynamics of the sensorimotor rhythms amplitude. The data obtained can be used to construct BCI paradigms with detection and prevention of errors based on EEG reactions.

Keywords: error potential, BCI, desynchronization, feedback

Введение. В ЭЭГ-исследованиях процесс анализа ошибок изучается при помощи оценки потенциалов, связанных с событиями (ПСС). Связанные с ошибкой потенциалы (ErrP) содержат компоненты, отражающие различные стадии восприятия ошибки. Наиболее изученной является волна Ne , которая развивается через 250 мс после обнаружения ошибки и отражает процессы эмоционального реагирования. Следом за ней развивается потенциал Pe , который отражает процессы коррекции поведения [1]. Также авторы [2] описали компонент, специфичный для ИМК-управления (потенциал

взаимодействия, P_i). Его амплитуда увеличивается, когда выполненная ИМК-команда отличается от задуманной пользователем.

При этом существует мало исследований, посвященных изучению динамики амплитуды ритмов ЭЭГ при восприятии ошибок. Однако оценка изменений спектральных характеристик ЭЭГ могла бы повысить надежность распознавания ИМК-ошибок. В настоящей работе проведен анализ амплитуды сенсомоторных ритмов ЭЭГ и компонентов ПСС в ответ на корректные и ошибочные движения виртуальной кисти, запускаемые при помощи ИМК-П300.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 20 добровольцев (11 женщин, средний возраст 25 лет). Протокол исследования был одобрен комиссией по биоэтике МГУ имени М. В. Ломоносова. Испытуемые управляли движениями пальцев виртуальной кисти при помощи ИМК-П300. Управляющими стимулами служили подсветки пальцев. Для запуска движения пальца испытуемые концентрировали внимание на его подсветках. После работы с подсветками осуществлялся алгоритмический запуск движения. Всего испытуемому предлагалось 40 попыток. Точность классификации была намеренно снижена (без ведома испытуемых), и у каждого испытуемого насчитывалось 15 ошибочных срабатываний (сгибался нецелевой палец). Во время наблюдения обратной связи в виде движений проводилась регистрация ЭЭГ-сигнала в 48 отведениях при помощи усилителя NVX-52 («МКС», Зеленоград). Момент запуска движения был синхронизирован с ЭЭГ при помощи фотодатчика. Для анализа ПСС ЭЭГ сигнал был сегментирован на эпохи $[-200, 900]$ мс относительно запуска движения. Интервал $[-200, 0]$ мс был использован для коррекции базового уровня. Эпохи усреднялись для состояний с корректными и ошибочными срабатываниями. Для статистической оценки ПСС был использован непараметрический тест с перестановками, основанный на кластерах [3]. Для анализа связанной с событием синхронизации/десинхронизации (ССС/Д) мю/бета-ритмов были построены специфические фильтры при помощи алгоритма общих пространственных паттернов (CSP). Для этого использовались отрезки ЭЭГ $[-4, -2]$ с (состояние покоя), и $[0, 2]$ с от начала движения. Отобранные фильтры применялись к сигналу, затем рассчитывалась плотность спектральной мощности.

Полученные величины нормировались на значение покоя и переводись в децибелы. Положительные значения соответствовали ССС, отрицательные — ССД. Для оценки влияния факторов «Время» и «Корректность» движения на амплитуду ССС/Д был использован *two-way rm-ANOVA*.

Результаты. В ответ на обратную связь у испытуемых развивался потенциал *Pe* в диапазоне 300–500 мс после начала движения. Его амплитуда была выше в условиях с ошибкой (значимые различия показаны для FCz, Cz, CPz). Также развивались потенциалы *Ne* и *Pi*, однако их амплитуда значимо не различалась между условиями с ошибочным и корректным движениями (рис. 5).

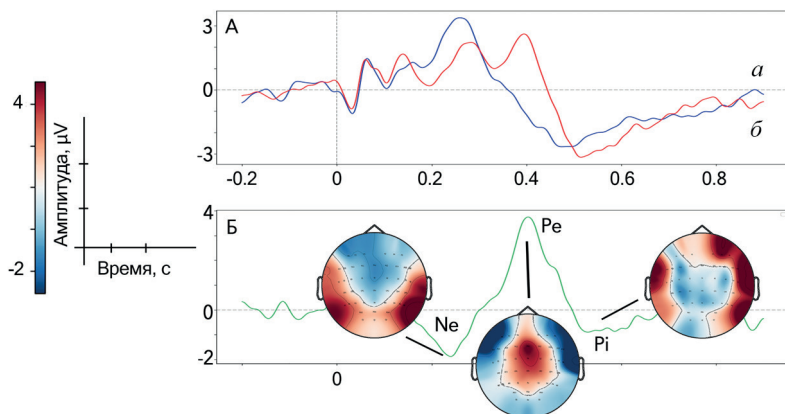


Рис. 5. Потенциалы, связанные с особенностями:

А — усредненный в отведении FCz: *a* — для корректных движений; *б* — для ошибочных движений; Б — разностный в отведении FCz*

Было обнаружено, что наблюдение движений вызывает снижение амплитуды мю-ритма и рост амплитуды бета-ритма. Показано значимое влияние фактора «Время» на мю-ССД ($F = 27,48$, $p < 0,0001$) и бета-ССС ($F = 24,60$, $p < 0,0001$). Мю-ССД была сильнее при корректных движениях ($F = 10,46$, $p = 0,005$), а бета-ССС — при ошибочных, $n = 20$ ($F = 6,78$, $p = 0,02$) (см. рис. 6).

* Для компонентов представлены топографические карты распределения амплитуды.

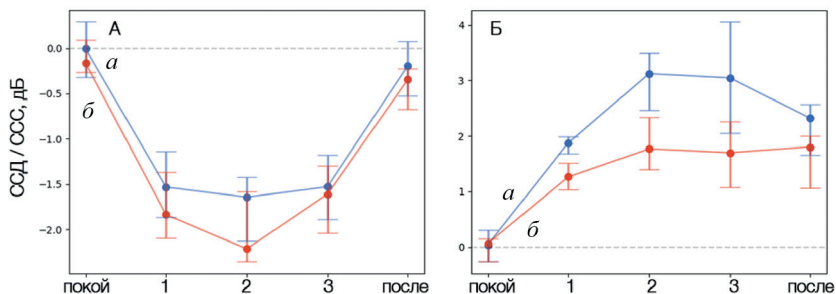


Рис. 6. Результаты наблюдения движений:

А — мю-ССД, Б — бета-ССД; *a* — корректные движения; *b* — ошибочные движения; 1, 2, 3 — временные интервалы, соответствующие началу сгибания, фазе полного сгибания и фазе разгибания*

Наблюдение движений вызывало развитие мю-ССД, что согласуется с результатами [4]. В настоящем исследовании стимулы с движением несли информацию об успешности работы испытуемого, поскольку демонстрировались как обратная связь. Было обнаружено, что амплитуда ССД и ССС была чувствительна к ее корректности. Развитие бета-ССС при наблюдении ошибочных действий связывают с торможением моторной коры и остановкой внутренней имитации при обнаружении ошибки [5].

Заключение. В настоящей работе получены данные о вовлечении в процессы оценки подкрепления и ошибок сенсомоторных областей коры. Это опосредовано, вероятно, видом обратной связи (движение). Важно отметить, что стимулы с корректными и ошибочными движениями визуально не различались, отличия определялись только установкой испытуемого, определяемой ИМК-парадигмой. Их восприятие связано с процессами подкрепления и анализа поведения. Эти процессы отражаются в амплитуде компонентов ПСС, в частности, потенциала *Pe*, связанного с обращением к долговременной памяти и торможением неэффективного поведения [1]. Таким образом, показано, что, помимо компонентов *ErgP* для создания надежных ИМК-систем, могут быть использованы изменения амплитуды сенсомоторных ЭЭГ-ритмов. Сенсомоторные отделы

* Показаны медианные значения, Q1, Q3.

коры участвуют в анализе результативности в контуре ИМК, где стимулами обратной связи выступают движения.

Библиографические ссылки

1. *Glazer J. E. et al.* Beyond the FRN: Broadening the time-course of EEG and ERP components implicated in reward processing // *Int. J. Psychophysiol.* 2018. Oct. Vol. 132 (Pt B). P. 184–202.

2. *Ferrez P. W., Millán J. R.* Error-Related EEG Potentials Generated During Simulated Brain — Computer Interaction // *IEEE Trans. Biomed.* 2014. P. 923–929.

3. *Maris E., Oostenveld R.* Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data // *J. Neurosci. Methods.* 2007. P. 177–190.

4. *Lapenta O. M., Boggio P. S.* Motor network activation during human action observation and imagery : Mu rhythm EEG evidence on typical and atypical neurodevelopment // *Res. Autism Spectr. Disord.* 2014. P. 759–766.

5. *Koelewijn T. et al.* Motor-cortical beta oscillations are modulated by correctness of observed action // *Neuroimage.* 2008. Apr. Vol. 40, iss. 2. P. 767–775.

В. А. Шамаков

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет
Томск, Россия*

Исследование показателей электрической активности кожи при регуляции математической тревожности*

Математическая тревожность у школьников и студентов может оказывать влияние на выбор профессий, связанных с математикой. Ведется поиск способов снижения и регуляции математической тревожности. В России данный вопрос почти не изучен. В настоящей работе исследуются показатели электрической активности кожи у участников с высоким

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-013-00742.