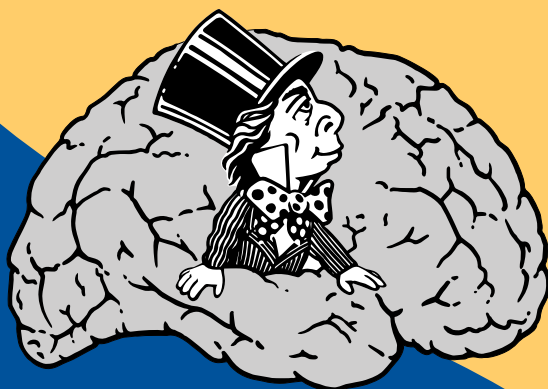


# КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
2019

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман

УДК 159.9  
ББК 88.25  
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 19 июня 2019 г. Под ред. Е. В. Печенковой, М. В. Фаликман. – М.: ООО «Буки Веди», ИППиП. 2019 г. – 656 стр.

ISBN 978-5-4465-2346-7

УДК 159.9  
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-2346-7

©Авторы статей, 2019

## ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ СОВЕРШЕНИЯ И ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБКИ: ИССЛЕДОВАНИЕ С РЕГИСТРАЦИЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МЫШИ

В. А. Медведев\* (1), К. Э. Сайфулина (1, 2), А. М. Рытикова (1), Н. Б. Тюленев (1), Б. В. Чернышев (1, 2, 3)

[ixdon@yandex.ru](mailto:ixdon@yandex.ru)

1 – МГППУ, Москва; 2 – МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва;

3 – НИУ ВШЭ, Москва

**Аннотация.** Мониторинг эффективности выполнения задачи включает в себя выявление результатов действий и инициирование соответствующих поведенческих адаптаций. Этот процесс основан на проверке прогнозов результата, которая проявляется на электрофизиологическом уровне как ERN/CRN (негативность, связанная с ошибкой/негативность, связанная с правильностью). Осведомленность о результатах действия, по-видимому, связана с позитивностью ошибки (Pe). В текущем исследовании мы изучали соотношение между поведенческими показателями выполнения задачи и компонентами ВП: N2, ERN/CRN и Pe. Испытуемые выполняли когнитивно-затратную конденсационную задачу. Мы использовали регистрацию перемещения мыши для регистрации ответов испытуемых, что позволило нам получить два независимых поведенческих показателя: время начала перемещения и продолжительность перемещения. Время начала перемещения можно рассматривать как обычное время реакции. N2 был увеличен, а CRN уменьшен для «поздних» правильных ответов по сравнению с «ранними» правильными ответами. Эти результаты можно объяснить тем, что «поздние» ответы характеризуются более высоким уровнем конфликта до ответа и более высоким уровнем неопределенности, в то время как «ранние» ответы – более низким уровнем конфликта и неопределенности. Продолжительность перемещения была новым независимым поведенческим параметром, который не может быть измерен с помощью традиционных нажатий на клавиши. Сигнал ВП во временном окне раннего Pe был более позитивным для «длинных» ответов по сравнению с «короткими», что можно объяснить механизмами торможения выполняемого ответа. Мы предполагаем, что этот эффект связан с остановкой ответа, которая может быть связана с осведомленностью о результатах.

**Ключевые слова:** когнитивный контроль, детекция ошибки, исправление ошибки, неопределенность, регистрация перемещения компьютерной мыши

Исследование было выполнено в рамках программы фундаментальных исследований научно-исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ВШЭ) в 2018 году.

### Введение

Детекция и исправление ошибок крайне важны в любой области человеческой деятельности. Известно, что с совершением ошибок связаны два компонента ВП относительно реакции: ERN (error-related negativity), негативный

компонент с пиком около 100 мс после ответа, и *Pe* (error positivity), положительный компонент с пиком около 250 мс после ответа (Falkenstein et al., 1991). При определенных условиях компонент, аналогичный ERN, может присутствовать на ВП в случае правильных ответов; как правило, в таких случаях используют обозначение CRN (correct-related negativity). N2, компонент ВП относительно стимула с латентностью около 250 мс, имеет сходную с ERN функциональную роль и аналогичную топографию (Falkenstein et al., 2000). Некоторые исследования разделяют ранний и поздний подкомпоненты *Pe* (van Veen and Carter, 2002).

Существует много исследований детекции ошибок: было показано, что амплитуда ERN зависит в первую очередь от выраженности конфликта реакций, в то время как *Pe* более явно связан с осознанием ошибки (Wessel, 2012). Однако корреляты исправления ошибок недостаточно изучены.

Исправление ошибки может принимать форму корректирующего ответа, который следует за первоначальным ошибочным ответом или накладывается на него (Kieffaber et al., 2016), но чаще можно наблюдать просто остановку (подавление, удержание) ошибочного ответа. На поведенческом уровне процесс остановки может проявляться в уменьшении силы нажатия на клавиши (Rabbitt, 1978), или увеличении времени реакции в ошибочных реализациях (Novikov et al., 2015; Novikov et al., 2017; van Driel et al., 2012).

Регистрация перемещения компьютерной мыши является потенциально более универсальным методом регистрации ответов по сравнению с регистрацией нажатия на клавиши (Freeman et al., 2011). Киффабер с соавторами (Kieffaber et al., 2016) использовали регистрацию перемещения компьютерной мыши в методике с подсказкой, задающей переключение установки на выполнение задачи (cued task-set switching), и сообщили, что *Pe* наблюдался на ВП только в случае исправленных ошибок, но не в случае совершенных ошибок; ERN присутствовал на ВП для обоих типов ошибок.

Связь между ERN/CRN и *Pe* с исправлением/остановкой ответа остается недостаточно изученной; особенно мало известно о предреакционных процессах, которые задают уровень неопределенности, который, в свою очередь, влияет на процессы детекции и исправления ошибки.

В текущем исследовании мы применили регистрацию перемещения мыши в слуховой конденсационной задаче, аналогичной той, которая использовалась в предыдущих исследованиях с регистрацией нажатия на клавиши (Novikov et al., 2015; Novikov et al., 2017). Регистрация перемещения компьютерной мыши позволила нам зарегистрировать два параметра ответа: время начала перемещения мыши и продолжительность перемещения мыши. Мы предположили, что время начала перемещения аналогично времени реакции, и мы рассматривали продолжительность перемещения как дополнительную меру, чувствительную к остановке ответа после его инициализации.

В настоящей работе проверялись следующие предсказания:

1. Известно, что состояние неопределенности/конфликта перед ответом приводит к увеличению времени реакции и увеличению амплитуды N2 (Yeung, 2014); кроме того, это приводит к ухудшению внутренней детекции ошибок (Novikov et al., 2017). Таким образом, мы ожидали, что более позд-

нее время инициирования ответа будет связано с увеличением амплитуды N2 и снижением амплитуды ERN/CRN.

2. Мы рассматривали увеличение продолжительности перемещения как проявление процесса остановки, который тормозит выполняемый ответ и может быть связан с осознанием ошибки; таким образом, мы ожидали увидеть большую амплитуду Pe для ответов с увеличенной продолжительностью перемещения.

## Методы

В эксперименте участвовал 41 испытуемый ( $21.6 \pm 3.7$  года). Были использованы четыре предварительно записанных слуховых стимула. Стимулы представляли собой записи либо каллиопы, либо виолончели нот A4 (440 Гц) или C5 (523 Гц). Участники должны были совершать ответ в соответствии с сочетанием признаков (рис. 1, слева), перемещая курсор мыши из «исходного» положения в левую или правую область ответа (рис. 1, справа). Во время выполнения задачи регистрировалась ЭЭГ испытуемых.

Поля ответа и курсор были скрыты в течение всех пяти экспериментальных сессий по 100 реализаций; обратная связь не показывалась испытуемым. Это было сделано для уменьшения вклада движений глаз в ЭЭГ.

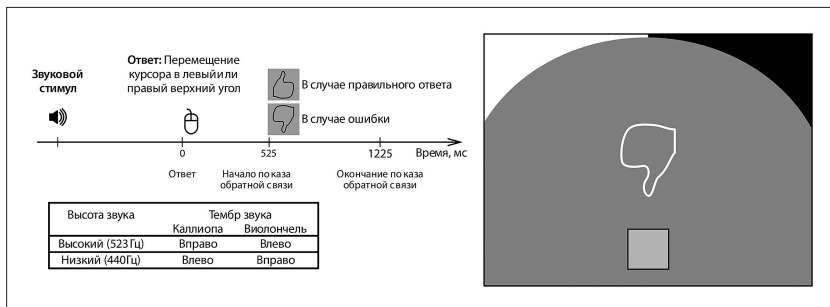
Мы сравнили амплитуды компонентов ВП относительно реакции – ERN/CRN (Fcz, 10–110 мс), раннего Pe (Fcz, 120–265 мс) и позднего Pe (Pz, 270–425 мс), используя парный *t*-тест в следующих контрастах: правильные ответы против ошибок; «ранние» правильные против «поздних» правильных ответов (предельные квартили по времени начала перемещения), «короткие» правильные против «длинных» правильных ответов (предельные квартили по продолжительности перемещения). Кроме того, мы проанализировали компонент N2 ВП относительно стимула (Fcz, 230–300 мс). В качестве базового уровня для всех ВП использовался предстимульный интервал в 200 мс. Временные рамки компонентов ВП обозначены на рис. 2 затемненными областями.

## Результаты

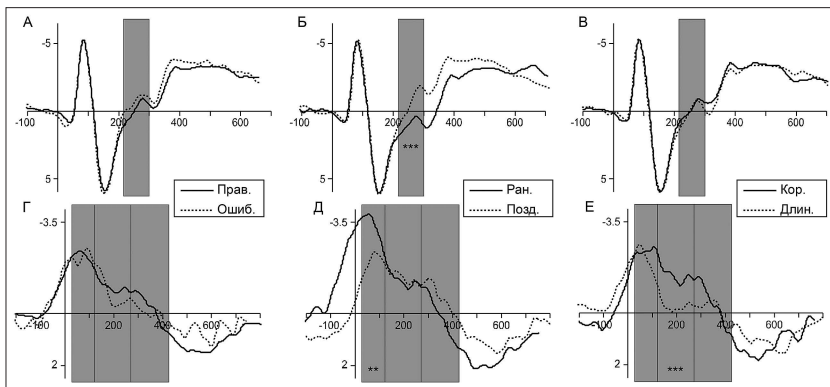
Из вошедших в анализ реализаций 88 % имели правильный ответ, 12 % – ошибку. Среднее время реакции составило  $1101 \pm 59$  и  $1324 \pm 78$  мс для правильных ответов и ошибок соответственно; среднее время движения –  $197 \pm 10$  и  $217 \pm 13$  мс соответственно.

Компонент N2 был значительно больше для «поздних» правильных ответов по сравнению с «ранними» правильными ( $t_{15} = 7.33$ ,  $p < .001$ ) (рис. 2Б). Не было обнаружено различий в амплитуде N2 между правильными и ошибочными ответами, а также между «короткими» и «длинными» правильными ответами ( $p > .05$ ). Различий между амплитудой CRN и ERN (рис. 2Г) обнаружено не было ( $p > .05$ ). CRN имел более высокую амплитуду для «ранних» по сравнению с «поздними» правильными ( $t_{15} = 3.32$ ,  $p = .004$ ); Амплитуда CRN не отличалась между «короткими» и «длинными» ответами ( $p > .05$ ).

Сигнал ВП был более положительным в раннем временном интервале Pe для «длинных» правильных ответов по сравнению с «короткими» правильными



**Рисунок 1.** Слева: схема эксперимента. Справа: расположение элементов на экране в процессе эксперимента



**Рисунок 2.** Форма сигнала ВП, усредненного по всем испытуемым, вошедшим в анализ ЭЭГ ( $n = 16$ ). Сверху: ВП относительно стимула (А, Б, В); снизу: ВП относительно реакции (Г, Д, Е). Слева направо: правильные ответы против ошибок (А, Г); «ранние» правильные ответы против «поздних» (Б, Д); «короткие» правильные ответы против «длинных» (В, Е)

ответами ( $t_{15} = 5.01, p < .001$ ) (рис. 2Г, 2Д, 2Е). Различий во временном окне позднего Ре (270 – 425 мс) не было обнаружено ( $p > .05$ ). Ни ранний Ре, ни поздний Ре не различались между правильными ответами и ошибками ( $p > .05$ ) (рис. 2Г, 2Д, 2Е).

Менее 1 % испытаний в настоящем исследовании соответствовали критериям исправленных ошибок, предложенных Kieffaber et al. (2016).

### Обсуждение и выводы

Используя компьютерную мышь для регистрации ответов испытуемых, мы получили данные не только о времени реакции, но и о продолжительности ответа, что позволило нам более детально рассмотреть данные ВП.

Известно, что ERN и CRN имеют сравнимые амплитуды в условиях высокой неопределенности (Pailing, Segalowitz, 2004). Таким образом, мы подтвердили наше теоретическое предположение о высоком уровне неопределенности в большинстве реализаций в слуховой конденсационной задаче (Novikov et al., 2017).

Мы наблюдали, что N2 был уменьшен, а CRN – увеличен для «ранних» правильных ответов по сравнению с «поздними» правильными. Данильмейер с соавторами (Danielmeier et al., 2009) получили аналогичные результаты по обратной зависимости между N2 и ERN/CRN в фланговой задаче. Можно предположить, что в условиях более низкой неопределенности конфликта не возникает и N2 имеет небольшую амплитуду, а время реакции мало. После того как ответ был инициирован, может быть активирована альтернативная моторная программа, заставляющая внутреннюю систему обнаружения результатов сигнализировать о необходимости дополнительной проверки текущего ответа. Этот сигнал проявляется на ЭЭГ как увеличение ERN/CRN.

Мы предполагаем, что ранний Pe связан с торможением (остановкой) выполняемого ответа; эти результаты согласуются с экспериментальными данными, связывающими Pe с осознанием ошибки.

## Литература

- Danielmeier C., Wessel J. R., Steinhauser M., Ullsperger M. Modulation of the error-related negativity by response conflict // *Psychophysiology*. 2009. Vol. 46. No. 6. P. 1288 – 1298. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00860.x
- van Driel J., Ridderinkhof K. R., Cohen M. X. Not all errors are alike: Theta and alpha EEG dynamics relate to differences in error-processing dynamics // *Journal of Neuroscience*. 2012. Vol. 32. No. 47. P. 16795 – 16806. doi:10.1523/jneurosci.0802-12.2012
- Falkenstein M., Hohnsbein J., Hoormann J., Blanke L. Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1991. Vol. 78. No. 6. P. 447 – 455. doi:10.1016/0013-4694(91)90062-9
- Falkenstein M., Hoormann J., Christ S., Hohnsbein J. ERP components on reaction errors and their functional significance: A tutorial // *Biological Psychology*. 2000. Vol. 51. No. 2 – 3. P. 87 – 107. doi:10.1016/s0301-0511(99)00031-9
- Freeman J., Dale R., Farmer T. Hand in motion reveals mind in motion // *Frontiers in Psychology*. 2011. Vol. 2. doi:10.3389/fpsyg.2011.00059
- Kieffaber P. D., Hershaw J., Sred J., West R. Electrophysiological correlates of error initiation and response correction // *NeuroImage*. 2016. Vol. 128. P. 158 – 166. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.12.046
- Novikov N. A., Bryzgalov D. V., Chernyshev B. V. Theta and alpha band modulations reflect error-related adjustments in the auditory condensation task // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2015. Vol. 9. doi:10.3389/fnhum.2015.00673
- Novikov N. A., Nurislamova Y. M., Zhozhikashvili N. A., Kalenkovich E. E., Lapina A. A., Chernyshev B. V. Slow and fast responses: Two mechanisms of trial outcome processing revealed by EEG oscillations // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017. Vol. 11. doi:10.3389/fnhum.2017.00218
- Pailing P. E., Segalowitz S. J. The effects of uncertainty in error monitoring on associated ERPs // *Brain and Cognition*. 2004. Vol. 56. No. 2. P. 215 – 233. doi:10.1016/j.bandc.2004.06.005

*Rabbitt P.* Detection of errors by skilled typists // *Ergonomics*. 1978. Vol. 21. No. 11. P. 945 – 958. doi:10.1080/00140137808931800

*van Veen V., Carter C. S.* The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2002. Vol. 14. No. 4. P. 593 – 602. doi:10.1162/08989290260045837

*Wessel J. R.* Error awareness and the error-related negativity: Evaluating the first decade of evidence // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. doi:10.3389/fnhum.2012.00088

*Yeung N.* Conflict monitoring and cognitive control // *The Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience: The Cutting Edges* / K. N. Ochsner, S. Kosslyn (Eds.). Oxford: Oxford University Press, 2014. P. 275 – 299.

## **ELECTROENCEPHALOGRAPHIC CORRELATES OF ERROR COMMISSION AND CORRECTION: A MOUSE TRACKING STUDY**

V. A. Medvedev\* (1), K. E. Sayfulina (1, 2), A. M. Rytikova (1),  
B. V. Chernyshev (1, 2, 3)

[ixdon@yandex.ru](mailto:ixdon@yandex.ru)

1 – MSUPE, Moscow; 2 – Lomonosov MSU, Moscow; 3 – Higher School of Economics, Moscow

**Abstract.** Performance monitoring includes detection of action outcomes and initiation of relevant behavioral adjustments. This process is based on the verification of an action-outcome prediction, which is manifested on an electrophysiological level as ERN/CRN (error-related negativity/correct-related negativity). Outcome awareness is apparently related to error positivity (Pe). In the present study, we examined the relation between behavioral parameters of performance and three ERP components: N2, ERN/CRN and Pe. Participants performed a cognitively demanding condensation task. We used computer mouse tracking as a method of response registration, which allowed us to measure two independent behavioral parameters: mouse movement initiation time and movement duration. Movement initiation time may be considered similar to reaction time. N2 was increased, and CRN was decreased for “late” correct responses compared to “early” correct ones. These results may be explained by the fact that late responses are characterized by a higher level of pre-response uncertainty and conflict compared to early ones. Movement duration was an additional independent variable, which could not be measured using a keystroke method of response registration. We showed that the ERP signal was more positive in the early Pe time window for “long” correct responses compared to “short” ones. We assume that early Pe is related to stopping an ongoing response which, in turn, is related to outcome awareness.

**Keywords:** cognitive control, error detection, error correction, response uncertainty, mouse tracking