

## **КОГНИТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ: НОВЫЕ МОЗГОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ, ВЫЯВЛЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ С ВЫСОКОЙ НАГРУЗКОЙ НА ВНИМАНИЕ**

Б. В. Чернышев (1, 2), Ю. М. Нурисламова (1), Н. А. Жожикашвили\* (1),  
Д. В. Брызгалов (1), Н. А. Новиков (1)

[nzhozhik@inbox.ru](mailto:nzhozhik@inbox.ru)

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

**Аннотация.** Когнитивный контроль включает в себя специфическое поддержание устойчивого внимания к стимулу и неспецифическую регуляцию моторного порога. Нарушение процессов одной из этих систем приводит к совершению разных видов ошибок, связанных со сбоями внимания и неопределенностью либо с нарушением моторного порога. В зависимости от вида совершенной ошибки последующее адаптационное изменение активности будет осуществляться двумя разными механизмами. Проведено два исследования с использованием слуховой конденсационной задачи, создающей высокую нагрузку на внимание. Анализировали осцилляции ЭЭГ в тета-, альфа- и бета-диапазонах. Полученные результаты показывают, что адаптивные перестройки после ошибок реализуются при участии фронто-медиальной сети мониторинга, теменной системы внимания и сенсомоторной сети. Кроме того, было обнаружено, что время реакции может служить индикатором эффективности работы каждой из сетей, позволяя разделить два типа реализаций: быстрые, с высоким уровнем внимания и низким уровнем неопределенности, и медленные, с низким уровнем внимания и высоким уровнем неопределенности. Результаты проведенных экспериментов в целом показывают, что применение конденсационной задачи в слуховой модальности является новым перспективным способом исследования мозговых механизмов когнитивного контроля.

**Ключевые слова:** когнитивный контроль, внимание, детекция ошибок, тета-осцилляции, альфа-осцилляции, постошибочные адаптации

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2017 году.

Данная работа посвящена исследованию таких функций когнитивного контроля, как детекция совершенной ошибки и адаптационные перестройки, следующие за ошибками (Yeung, 2014). Ошибки могут быть вызваны разными механизмами: излишним понижением моторного порога, приводящим к импульсивному, автоматическому ответу, и сбоями внимания, приводящи-

ми к нарушению процессов идентификации стимула и применения правил выполнения задачи (van Driel et al., 2012). Соответственно, после ошибок, вызванных нарушениями различных систем, будут следовать специфические типы адаптаций, сопровождающиеся характерными электрофизиологическими коррелятами: известно, что моторные ошибки связаны с постответным повышением фронтального тета-ритма средней линии, тогда как ошибки из-за сбоев внимания связаны с постответной депрессией альфа-осцилляций (O'Connell et al., 2009; van Driel et al., 2012). Также известно, что понижение моторного порога приводит к ускорению ответов при ошибке (Ridderinkhof et al., 2004; van Driel et al., 2012), тогда как понижение уровня внимания приводит к замедлению времени ошибочных ответов (Cohen, van Gaal, 2013).

Мы предположили, что разделение ответов на медленные и быстрые позволит отделить моторные ошибки от ошибок внимания. Для этого была использована слуховая модифицированная конденсационная задача Познера (Posner, 1964; Chernyshev et al., 2015), создающая высокую нагрузку на внимание и приводящая как к моторным ошибкам, так и к ошибкам внимания. Поскольку обычно когнитивный контроль исследуется с использованием зрительных задач, еще одной целью нашего исследования было обнаружение процессов, неспецифических по отношению к сенсорной модальности.

Эксперимент 1 был направлен на подтверждение применимости конденсационной задачи к исследованию когнитивного контроля и на выделение основных систем головного мозга, задействованных в процессах когнитивного контроля, эксперимент 2 — на разделение моторных ошибок и ошибок внимания.

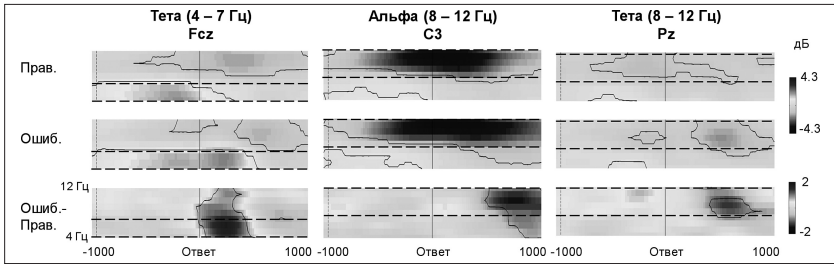
## Методика

В эксперименте 1 принял участие 71 испытуемый, в эксперименте 2 — 50 испытуемых. Задача состояла в равновероятном предъявлении четырех слуховых стимулов, различающимся по двум признакам, в ответ на которые требовалось нажать одну из двух кнопок в соответствии с правилом, требующим связывания этих признаков. После совершения реакции испытуемому давали зрительную обратную связь относительно правильности ответа (в эксперименте 1 — сразу после нажатия на кнопку, в эксперименте 2 — с задержкой 525 мс, для разделения эффектов, связанных с подачей ответа и с получением обратной связи).

В эксперименте 1 анализировали правильные ответы и ошибки. Дополнительно условия разделялись на правильные ответы, следующие за правильными ответами, правильные ответы, следующие за ошибками, и ошибки, следующие за правильными ответами.

В эксперименте 2 анализировали только правильные ответы и ошибки. Проводилось разделение ответов на быстрые и медленные по индивидуальной медиане времени реакции.

Статистический анализ производили с помощью метода беспорогового усиления кластеров (TFCE) в сочетании с пермутационной статистикой, применяли парный критерий Стьюдента, дисперсионный анализ и ранговую



**Рисунок 1.** Частотно-временные графики осцилляций в тета- и альфа-диапазонах на электродах Fcz, C3 и Pz относительно времени ответа. Верхняя панель соответствует мощности в реализациях с правильным ответом, средняя – в реализациях с ошибками, нижняя – разнице мощностей ошибки – правильные. Черным контуром обведены значимые зоны ( $p < .05$ , 4-D TFCE). Пунктирные линии определяют интересующий частотный диапазон.

корреляцию Спирмена. Результаты считали достоверными при уровне значимости менее .05 (с поправками на множественные сравнения с помощью пермутационного анализа и поправки Бонферрони).

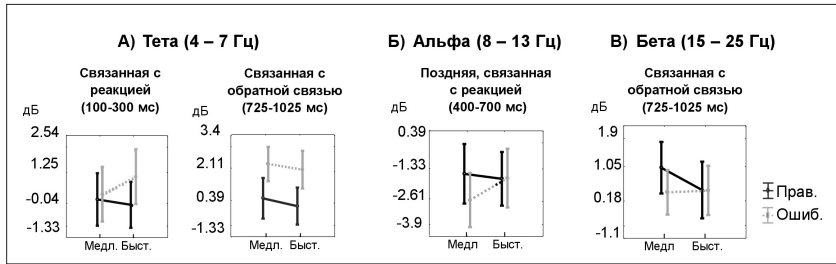
Чтобы отделить эффект осцилляций от эффекта вызванных потенциалов, предположительно имеющих иную физиологическую основу, в обоих экспериментах анализировалась индуцированная (не фазово-связанная) активность.

## Результаты

**Эксперимент 1.** Было выявлено значительное повышение постошибочных фронтальных тета-осцилляций средней линии (ФТСЛ), а также подавление постошибочных осцилляций в альфа-диапазоне в левых центральных и теменных электродах (рис. 1). Была обнаружена корреляция между мощностью альфа-осцилляций в левой центральной области и замедлением времени реакции после ошибок, мощность альфа-осцилляций в теменных областях коррелировала с успешностью выполнения задания, а увеличение мощности ФТСЛ коррелировало с обоими поведенческими показателями.

В пробах с правильными постошибочными реализациями значительное подавление осцилляций в альфа-диапазоне, широко распространенных по всей поверхности головы, начиналось раньше ответа, за которым следовала более слабая ФТСЛ-активность.

**Эксперимент 2.** Исследовали, можно ли разделить реакции с высокими и низкими уровнями внимания и неопределенности на основании времени реакции. Усиление ФТСЛ происходило только после быстрых ошибок, тогда как после медленных ошибок данного эффекта не наблюдалось. Показано значительное позднее подавление осцилляций в альфа-диапазоне только для медленных правильных ответов. Усиление бета-осцилляции после предъявления обратной связи происходило только после медленных ошибок. Результаты дисперсионного анализа представлены на рис. 2.



**Рисунок 2.** Мощность осцилляций для быстрых правильных ответов, медленных правильных ответов, быстрых ошибок и медленных ошибок. А — Осцилляции в тета-диапазоне в пост-реакционном окне и окне после предъявления обратной связи. Б — Альфа-осцилляции в позднем постреакционном окне. В — Бета-осцилляции в окне после предъявления обратной связи

## Обсуждение и выводы

Полученные данные подтверждают валидность применения слуховой конденсационной задачи для исследования механизмов когнитивного контроля и указывают на существование трех механизмов постошибочной адаптации мозговых сетей, модуляции активности которых связаны с ошибками: медиальная префронтальная сеть (контролирует необходимость увеличения когнитивного контроля), теменная сеть внимания (поддерживает устойчивое внимание) и сенсомоторная сеть (поддерживает принятие решений и выбор действия).

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что, во-первых, действительно существует как минимум два механизма осуществления ответной реакции, первый из которых связан с уровнем моторного порога, второй — с уровнем внимания; во-вторых, разделение ответов по времени реакции позволяет различить эти два типа ответов: медленные ответы связаны с низким уровнем внимания, тогда как быстрые — с низким уровнем моторного порога.

В совокупности результаты проведенных экспериментов показывают, что применение конденсационной задачи в слуховой модальности является перспективным способом исследования мозговых механизмов когнитивного контроля.

## Литература

- Chernyshev B. V., Lazarev I. E., Bryzgalov D. V., Novikov N. A. Spontaneous attentional performance lapses during the auditory condensation task: An ERP study // *Psychology & Neuroscience*. 2015. Vol. 8. No. 1. P. 4–18. doi:10.1037/h0101029
- Cohen M. X., van Gaal S. Dynamic interactions between large-scale brain networks predict behavioral adaptation after perceptual errors // *Cerebral Cortex*. 2012. Vol. 23. No. 5. P. 1061–1072. doi:10.1093/cercor/bhs069
- 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
- O’Connell R. G., Dockree P. M., Bellgrove M. A., Turin A., Ward S., Foxe J. J., Robertson I. H. Two types of action error: electrophysiological evidence for separable inhibitory and sustained

attention neural mechanisms producing error on go/no-go tasks // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2009. Vol. 21. No. 1. P. 93–104. doi:10.1162/jocn.2009.21008

*Posner M.I.* Information reduction in the analysis of sequential tasks // *Psychological Review*. 1964. Vol. 71. No. 6. P. 491–504. doi:10.1037/h0041120

*Ridderinkhof K.R., van den Wildenberg W.P., Segalowitz S.J., Carter C.S.* Neurocognitive mechanisms of cognitive control: The role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning // *Brain and Cognition*. 2004. Vol. 56. No. 2. P. 129–140. doi:10.1016/j.bandc.2004.09.016

*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, 2013. P. 275–299. doi:10.1093/oxfordhb/9780199988709.013.0018

### **Cognitive Control: Novel Brain Mechanisms Revealed by Time-Frequency Analysis of the Electroencephalogram During an Experimental Task with High Attentional Demand**

Chernyshev B.V. (1, 2), Nurislamova Y.M. (1), Zhozhikashvili N.A.\* (1), Bryzgalov D.V. (1), Novikov N.A. (1)

[nzhozhik@inbox.ru](mailto:nzhozhik@inbox.ru)

1 – National Research University Higher School of Economics, Moscow;

2 – Lomonosov Moscow State University, Moscow

**Abstract.** Cognitive control includes specific maintenance of sustained attention to a stimulus and non-specific regulation of a motor threshold. Failures in each system lead to different types of errors, associated with attentional lapses and uncertainty or dysfunction of the motor threshold. Subsequent adaptive adjustments can be implemented through two different mechanisms, depending on the type of error. Two experiments were conducted using the auditory condensation task, which is highly demanding for sustained attention. We analyzed EEG oscillations in theta, alpha and beta bands. The results indicate that adaptive adjustments after errors are implemented by the frontal-medial network of task monitoring, the parietal attentional network and the sensorimotor network. Moreover, we discovered that response times may serve as an efficiency marker of each network, which allows us to distinguish between two types of responses: fast responses with a high level of attention and low level of uncertainty, and slow responses with a low level of attention and high level of uncertainty. Jointly, the results of both experiments demonstrate that the condensation task in an auditory modality is a new prospective method for investigating the brain mechanisms of cognitive control.

**Keywords:** cognitive control, attention, error detection, theta oscillations, alpha oscillations, post-error adaptations