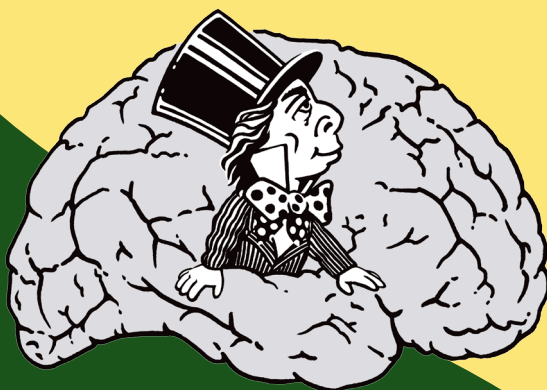


# КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
2023

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

УДК 159.9  
ББК 88.25  
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 21 – 22 июня 2023 г. Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. – М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа. 2023 г. – 604 стр.

© Авторы статей, 2023

ISBN 978-5-4465-3880-5

УДК 159.9  
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-3880-5

© Авторы статей, 2023

## **ОБУЧЕНИЕ ПРОДОЛЖАЕТСЯ: БЕТА-РИТМ УСИЛИВАЕТСЯ НА ВТОРОЙ ДЕНЬ НАУЧЕНИЯ АССОЦИАЦИЯМ МЕЖДУ ДВИЖЕНИЕМ И СЛОВОМ**

А. М. Разоренова (1, 2, 3), А. А. Павлова\* (1, 2), А. Ю. Николаева (1),  
А. О. Прокофьев (1), Б. В. Чернышев (1, 2, 4), Т. А. Строганова (1)  
[anne.a.pavlova@gmail.com](mailto:anne.a.pavlova@gmail.com)

1 – Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва; 2 – Сколковский институт науки и технологий, Москва;  
3 – Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва; 4 – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

**Аннотация.** Нейрофизиологические механизмы, лежащие в основе научения новым словам, остаются малоизученными. Было предположено, что синхронизация в  $\beta$ -ритме (15–25 Гц) способствует консолидации знания в памяти. В данной работе мы стремились оценить динамику  $\beta$ -синхронизации на протяжении двух дней обучения новым словоформам. Мы регистрировали магнитоэнцефалограмму, пока 27 испытуемых методом проб и ошибок учили, какая из восьми предъявленных словоформ означает какое движение / отсутствие движения. Мы также анализировали вызванные поля (ВП) на пассивное предъявление тех же словоформ до и после научения каждый день. Поведенчески участники усвоили ассоциации между словоформами и движениями к концу первого дня. Ни сон, ни повторение ассоциативного правила во второй день не оказали влияния на уже безошибочное выполнение задания. Однако различия в ВП между словоформами, означающими движение и не связанными с движением, появились лишь в конце второго дня, что заставляет предположить, что консолидация ассоциативного знания в семантической памяти произошла только после повторения во второй день. Примечательно, что  $\beta$ -синхронизация в лобных отделах отражала паттерн поведенческих реакций (возникла сразу после усвоения правил в первый день обучения и далее не менялась), в то время как мощность  $\beta$ -ритма в задней височной и теменной коре непрерывно росла на протяжении обоих дней, что свидетельствует о его значимости для успешной консолидации выученных ассоциаций.

**Ключевые слова:** ассоциативное научение, консолидация, бета-осцилляции, вызванные потенциалы, магнитоэнцефалография

### **Введение**

Пополнение своего лексикона новыми словами — задача, с которой сталкиваются люди на протяжении всей жизни. Но, несмотря на очевидную важность этого процесса, его физиологические механизмы остаются не до конца понятными. Широко распространена теория двухстадийного научения (Davis, Gaskell, 2009), постулирующая, что формирование словесной репрезентации

проходит в два этапа: первоначально слово удерживается в памяти благодаря структурам гиппокампальной формации без значимого участия неокортекса. На втором этапе запоминания происходит консолидация – долговременные пластические изменения в неокортексе, делающие репрезентацию слова независимой от активности гиппокампа. Одним из условий консолидации долгое время считался ночной сон.

В предыдущей работе нашей лаборатории было показано, что оперантное научение четырем ранее неизвестным словоформам сопровождалось усилением мощности нейронных колебаний в  $\beta$ -диапазоне (15 – 25 Гц) в ассоциативных областях коры (Pavlova et al., 2023).  $\beta$ -синхронизация была характерна только для поздней стадии обучения, когда ассоциации между словоформами и означаемыми движениями были надежно усвоены, и, по-видимому, служила механизмом удержания и реверберации новоприобращенной ассоциации внутри функциональных сетей, связанных с памятью: например, связывающих парагиппокампальную извилину, ретроспленальную и лобную кору. В данной работе мы хотели оценить динамику мощности  $\beta$ -ритма во время выполнения той же задачи после ночного сна и после повторения ассоциативного правила во второй день.

Кроме того, мы дополнили анализ исследованием вызванного ответа коры (вызванные поля, ВП) на пассивное предъявление тех же словоформ до и после обучения. Предъявление стимулов в тот момент, когда внимание человека отвлечено другой задачей, позволяет оценить глубину автоматической обработки в отсутствие эффектов внимания или сознательного припоминания. Мы предполагали, что появление различий между словоформами, получившими в ходе обучения связь с движениями («протослова»), и словоформами без такой связи («дистракторами») будет свидетельством интеграции приобретенного семантического знания, достаточно прочной, чтобы информация могла извлекаться автоматически.

## Методика

Двадцать семь добровольцев (от 20 до 35 лет, средний возраст=25.7, правши, без неврологических заболеваний) методом проб и ошибок устанавливали и запоминали однозначное соответствие между четырьмя аудиально предъявленными словоформами и четырьмя движениями конечностями (нажатие на кнопку правой или левой рукой / нажатие на педаль левой или правой ногой). Еще четыре словоформы оставались «дистракторами» – их предъявление не требовало совершения движения. Все словоформы были двусложными (например, «хича», «хишу», «хиса», «хиву») и были рандомизированы между испытуемыми, так что один и тот же стимул для половины испытуемых получал ассоциацию с движением (становился «протословом»), для другой половины – оставался «дистрактором». Процесс обучения соответствовал критериям оперантного научения: в ответ на предъявленную словоформу испытуемые совершали движение / воздерживались от движения и получали слуховую обратную связь.

Магнитоэнцефалограмма (МЭГ, 306 сенсоров) регистрировалась на протяжении двух дней. Для анализа мощности  $\beta$ -ритма МЭГ регистрировалась непосредственно во время сессий активного обучения: 1) в его начале, когда испытуемые совершали случайные движения, пытаясь угадать связь между словоформой и движением / отсутствием движения; 2) в конце обучения первого дня, когда испытуемые, успешно научившись, избирательно реагировали на определенные словоформы – «протослова»; 3) в начале второго дня, когда испытуемые повторяли ассоциативное правило после сна; 4) в конце активной сессии на второй день. Полученные данные были поделены на эпохи анализа от  $-1000$  до  $1400$  мс относительно начала движения, и был проведен временно-частотный анализ с использованием мультитейперов. Частотное разрешение было установлено в  $2$  Гц. Мощность  $\beta$ -ритма в выбранном диапазоне рассчитывалась как сумма мощностей двухгерцовых полос частот внутри диапазона  $15 - 25$  Гц. Полученные значения мощности были скорректированы делением на уровень фоновой активности во временном интервале от  $-500$  до  $-100$  мс относительно момента предъявления словоформы и переведены в дБ. Значения мощности  $\beta$ -ритма попарно сравнивались между активными сессиями с помощью  $t$ -теста для связанных выборок (с FDR-коррекцией на количество временных точек и сенсоров).

Для анализа вызванных полей (ВП) использовались данные из пассивных сессий, когда испытуемым через наушники предъявлялись все восемь словоформ в случайном порядке, в то время как их внимание было отвлечено просмотром немого фильма. Пассивное предъявление словоформ происходило до и после активных сессий в каждый из дней: 1) в самом начале эксперимента, до всякого обучения; 2) после обучения в первый день; 3) в начале второго дня, после ночного сна и до повторения правила; 4) в конце всей экспериментальной процедуры во второй день. Полученные МЭГ-данные были поделены на эпохи от  $-210$  до  $1400$  мс относительно начала звучания стимула. Полученные эпохи были усреднены для каждой словоформы на каждом сенсоре отдельно. Поскольку обработка слуховых и/или речевых стимулов связана в первую очередь с височной, нижнелобной и нижнетеменной корой вокруг Сильвиевой борозды (Hickok, Poeppel, 2016), для дальнейшего анализа мы отобрали сенсоры, лежащие над перисильвиевской корой каждого полушария (31 пара сенсоров в каждом полушарии). ВП между сенсорами были объединены подсчетом среднеквадратичного для каждого полушария. Затем среднеквадратичные были усреднены между «протословами» и «дистракторами» для каждого из четырех условий отдельно и нормализованы на фоновый уровень, подсчитанный по интервалу от  $-210$  до  $0$  мс перед началом стимула. Статистический анализ был проведен на так называемых двойных различиях: внутри каждой пассивной сессии ответ на «дистракторы» вычитался из ответа на «протослова», и получившиеся различия попарно сравнивались между пассивными сессиями с помощью  $t$ -теста для связанных выборок. Для коррекции на множественные сравнения применялась пермутационная процедура – так называемая *threshold-free cluster enhancement* (TFCE).

## Результаты и обсуждение

Поведенческие данные однозначно свидетельствуют, что испытуемые научились ассоциативным правилам в первый же день обучения. При переходе от первой ко второй активной сессии время реакции значимо падало ( $1.33 \pm 0.12$  секунды против  $1.26 \pm 0.11$  секунды,  $t(27) = 4.01$ ,  $p < .0001$ ) и фактически пропадали ошибки ( $34.18 \pm 8.93\%$  против  $1.08 \pm 0.92\%$ ,  $t(27) = 19.62$ ,  $p < .0001$ ). После чего поведенческие показатели выходили на плато: ни скорость реакции, ни количество ошибочных действий не менялись ни после ночного сна, ни после продолжения обучения во второй день.

Как и ожидалось, анализ мощности  $\beta$ -ритма показал значимую  $\beta$ -синхронизацию в ассоциативных областях коры на поздних стадиях обучения правильным ассоциациям между словоформами и движениями. При этом изменение мощности  $\beta$ -ритма демонстрировало разную динамику в зависимости от локализации. Синхронизация  $\beta$ -ритма в лобных областях отражала паттерн изменений в поведении: значимая синхронизация появлялась во второй активной сессии в первый день, когда испытуемый усваивал ассоциативные правила, и далее оставалась на одном и том же высоком уровне и после сна, и на протяжении всего второго дня. Такое поведение префронтальной  $\beta$ -синхронизации хорошо согласуется с приписываемой ей ролью в удержании ассоциативных правил, необходимых для выполнения задания (Miller et al., 2018). Напротив, мощность  $\beta$ -ритма в задних теменных и височных областях продолжала расти на протяжении второго дня.

Примечательно, что различия в ВП между «протословами» и «дистракторами» появлялись только в самом конце экспериментальной процедуры на второй день: разностный ответ между двумя видами стимулов начал значительно отличаться от дообученного состояния в период 450–550 мс после начала предъявления, что примерно соответствует окну семантической обработки речевых стимулов (Kutas, Federmeier, 2011). Статистические отличия были связаны с тем, что «протослова», получившие ассоциацию с движением, стали вызывать больший отклик в левом полушарии, чем «дистракторы». Важно подчеркнуть, что в более ранних пассивных сессиях (1)–(3) ВП не различались между двумя классами стимулов. Таким образом, несмотря на то что после раннего периода обучения в первый день испытуемые демонстрировали практически безупречное выполнение задания, интеграция смысла «протослов» в семантическую сеть происходила только к концу второго дня обучения. Мы предполагаем, что продолжавшая усиливаться  $\beta$ -синхронизация в теменных и задневисочных областях, часто связываемых с памятью, может служить механизмом такой консолидации ассоциативного правила.

Вопреки предположениям теории двухстадийного научения, ночной сон не повлиял на поведенческие и нейронные корреляты научения. По-видимому, сна самого по себе оказывается недостаточно, чтобы гарантировать консолидацию знания. Другие факторы (например, повторение правила в течение второго дня) не менее важны для переноса недавно усвоенных ассоциативных правил в долговременную память.

## Литература

Davis M.H., Gaskell M.G. A complementary systems account of word learning: Neural and behavioural evidence // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364. No. 1536. P. 3773–3800. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0111>

Hickok G., Poeppel D. Neural basis of speech perception // *Neurobiology of Language* Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 299–310. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-407794-2.00025-0>

Kutas M., Federmeier K.D. Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP) // *Annual Review of Psychology*. 2011. Vol. 62. No. 1. P. 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>

Miller E., Lundqvist M., Bastos A.M. Working memory 2.0 // *Neuron*. 2018. Vol. 100. No. 2. P. 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.09.023>

Pavlova A., Tyulenev N., Tretyakova V., Skavronskaya V., Nikolaeva A., Prokofyev A., Stroganova T., Chernyshev B. Learning of new associations invokes a major change in modulations of cortical beta oscillations in human adults // *Psychophysiology*. 2023. P. e14284. <https://doi.org/10.1111/psyp.14284>

## INCREASING LARGE-SCALE BETA-SYNCHRONIZATION DURING THE SECOND DAY OF PSEUDOWORD-MOVEMENT ASSOCIATIVE LEARNING

Alexandra Razorenova\* (1, 2, 3), Anna Pavlova (1, 3), Anastasia Nikolaeva (1), Andrey Prokofyev (1), Boris Chernyshev (1, 3, 4), and Tatiana Stroganova (1) [anne.al.pavlova@gmail.com](mailto:anne.al.pavlova@gmail.com)

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

2 – Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow;

3 – HSE University, Moscow; 4 – Lomonosov Moscow State University, Moscow

**Abstract.** The neural mechanisms underlying the learning of new words are understudied. Event-related synchronization in  $\beta$  rhythm (15–25 Hz) ( $\beta$ -ERS) supposedly contributes to strengthening cognitive representations in memory. Here, we evaluated  $\beta$ -power dynamics accompanying pseudoword learning on Day 1 and practicing the task after sleep, on Day 2. We recorded magnetoencephalographic signals while 27 participants learned, through trial and error, which of 8 acoustically presented pseudowords meant hand or foot movement or no movement at all. We examined event-related cortical fields (ERF) to an unattended presentation of the same pseudowords before and after each day's learning sessions. Behaviorally, participants mastered the associative rules by the end of Day 1, with errorless performance continuing after sleep and repetition of the rules during Day 2. Significant differences in ERFs between the pseudowords with and without the associated movements emerged only at the end of Day 2.  $\beta$ -ERS in the frontal regions mirrored the behavioral response pattern:  $\beta$ -ERS emerged once the rules were learned and did not change throughout Day 2. Meanwhile,  $\beta$ -ERS in the posterior temporal and parietal cortex grew throughout Day 2, putatively, contributing to the consolidation of new associations in long-term memory.

**Keywords:** associative learning, consolidation, beta oscillations, evoked potentials, magnetoencephalography