

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 612.821.2

ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭЭГ-АКТИВНОСТИ
ПРИ ИМПЛИЦИТНОМ НАУЧЕНИИ ПРАВИЛАМ
ИСКУССТВЕННОЙ ГРАММАТИКИ

© 2025 г. В. А. Баталова, В. В. Петров¹, С. Р. Абрамова², С. П. Кожевников^{2, *}

¹НЦ ГиНЖ, АНОО ВО "Научно-технологический университет "Сириус", Сочи, Россия

²Кафедра физиологии, клеточной биологии и биотехнологии,

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*e-mail: ksp55@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята к публикации 11.12.2024 г.

Исследовали изменение показателей биоэлектрической активности мозга при имплицитном (неосознаваемом) обучении. В ходе исследования показано, что имплицитное обучение сопровождается увеличением амплитуды в α 1-, α 2- и θ -частотных диапазонах преимущественно в лобно-височных областях коры. В более высокочастотном β -диапазоне амплитуда также возрастает, причем наиболее значительно – в теменно-затылочных и частично фронтальных областях коры. Наблюдаемые изменения позволяют предположить, что имплицитное обучение строится на основе взаимодействия двух относительно независимых нейронных сетей мозга. Лобно-височные отделы коры и осцилляторные системы α 1- и θ -частотных диапазонов обеспечивают процессы обработки информации и выявление релевантных последовательностей, тогда как теменно-затылочные отделы и осцилляторные системы β 2- и α 3-ритмов, вероятно, обеспечивают процессы ожидания и подготовки ответной реакции на релевантные последовательности и игнорирование нерелевантных. Процесс имплицитного обучения наиболее специфично связан изменения в диапазоне θ -ритма.

Ключевые слова: имплицитное обучение, внимание, ЭЭГ

DOI: 10.31857/S0044467725010061

Способность к обнаружению закономерностей в окружающей среде является центральной для многих аспектов человеческого познания. Однако во многом нерешенным остается вопрос о роли сознания и бессознательного в познавательной деятельности. Сознание, согласно традиционной точке зрения, обеспечивает обработку наиболее сложной информации, поступающей извне. Вместе с тем множество исследований показывают, что неосознаваемое (имплицитное) приобретение и переработка информации происходит несопоставимо быстрее и эффективнее (Агафонов и др., 2015; Schiff et al., 2021; Крюкова и др., 2022).

Исследование нейрофизиологических механизмов данного вида обучения с использованием нейровизуализационных методов показывает, что критическую роль в процессе имплицитного обучения играют медиальная височная доля и зрительные области (Altamura et al., 2014). Кроме того, имплицитное обучение требует активации недекларативной памяти, нейронные механизмы которой связаны с накоплением изменений, происходящих в нейронных

сетях, которые активированы во время начального процесса обучения, в таких областях мозга, как базальные ганглии, мозжечок (Silva et al., 2018). Некоторые фМРТ-исследования указывают на активацию гиппокампа, медиальной лобной, передней и средней поясной коры, затылочных и теменных областей мозга (Baeuchl et al., 2019; Sznabel et al., 2023).

Однако гораздо меньше известно о роли нейронной осцилляторной активности, которая обеспечивает процессы передачи и обработки информации в мозге, во время имплицитного обучения. Исследование биоэлектрической активности мозга при имплицитном обучении с использованием SRT- (serial reaction time) моделей показывает, что выполнение подобных задач модулирует мощность колебаний в β -, α - и θ -частотных диапазонах (Heideman et al., 2018; Meissner et al., 2018, 2019; Lum et al., 2019, 2023; Pollok et al., 2014; Tzvi et al., 2016).

В частности, в β -частотном диапазоне чаще всего фиксируется снижение амплитуды данного ритма в первичной моторной коре, что рассматривается как отражение реализации двигательных программ,

активируемых в данной модели обучения (Heideman et al., 2018). В диапазоне α -ритма имплицитное обучение сопряжено с ростом амплитуды в первичной моторной коре и теменно-затылочной доле (Pollok et al., 2014; Tzvi et al., 2016). Подобные изменения трактуются как снижение функциональной активности коры, связанное с автоматизацией двигательных реакций в процессе обучения. Что касается θ -ритма, имплицитное обучение сопровождается ростом амплитуды данного ритма (Meissner et al., 2018); интересно, что аналогичные изменения происходят во время явного (эксплицитного) обучения (van der Cruijsen et al., 2021). Это позволяет рассматривать данные осцилляции как возможный специфический маркер обучения, в том числе имплицитного. Однако некоторыми авторами (Tzvi et al., 2016) показано, что по мере выполнения большего количества испытаний в задаче SRT мощность θ -ритма снижалась.

Таким образом, остается неясным, связаны ли изменения в данных частотных диапазонах с процессами имплицитного обучения, или являются частью процессов по генерации и автоматизации ответных двигательных реакций. Возможным подходом к решению данной проблемы может являться применение моделей имплицитного обучения, не предполагающих быстрого моторного ответа. В связи с этим целью нашего исследования являлась оценка осцилляторной активности головного мозга с использованием модели имплицитного обучения буквенным последовательностям.

МЕТОДИКА

Моделирование имплицитного и эксплицитного обучения

Методологически наше исследование основано на работах Ребера по обучению искусственной грамматике – конечным последовательностям

букв, строящимся по заданному алгоритму (Reber, 1967) (рис. 1). Целью обучения является научение классифицировать стимулы (буквенные последовательности, ряды) со сложной вероятностной структурой.

Процедура обучения: как имплицитное, так и эксплицитное обучение включало в себя по 2 серии – обучающую и контрольную. Данные серии проводились отдельно для каждого вида обучения.

Перед обучающей серией испытуемым сообщали, что им предстоит принять участие в эксперименте, направленном на исследование памяти. В дальнейшем им предъявлялись стимулы (буквенные последовательности), составленные на основе правил искусственной грамматики, с задачей простого запоминания.

Перед контрольной серией испытуемым сообщалось, что стимулы были составлены не случайно, а на основе определенной системы правил, определяющей порядок букв в строчке. Далее испытуемому предъявлялись новые стимулы (буквенные последовательности) с задачей определить, какие из них соответствуют этой системе правил, а какие являются случайными наборами букв.

В качестве стимульного материала использовались буквенные последовательности, составленные из латинских букв: Т, Р, В, Х. Для создания последовательностей использовалась схема составления искусственных грамматических рядов, представленная на рис. 1. Для обучающей серии было использовано 20 последовательностей длиной от 5 до 11 букв. Для контрольной серии использовались 10 других последовательностей, созданных на основе правил искусственной грамматики, и 10 последовательностей, нарушающих данные правила. Все релевантные последовательности начинались с латинской буквы Т или В. Буквы Р или Х могли входить в цикл (одинаковые буквы находятся подряд) произвольное количество раз. Завершаться последовательность может одним из трех вариантов: PVT, VT или TV.

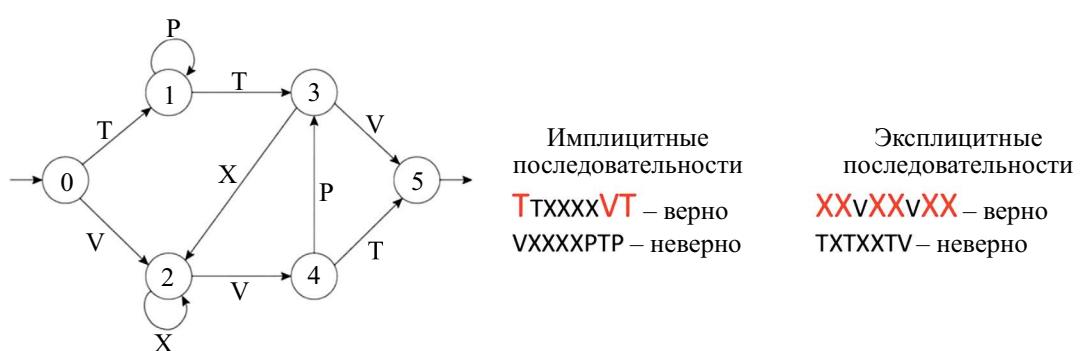


Рис. 1. Схема составления и примеры имплицитных буквенных рядов (Reber, 1967).

Fig. 1. Forming scheme and examples of implicit letter sequences (Reber, 1967).

В эксплицитной серии релевантные последовательности отвечают правилу «2 через 1», поэтому буквенные строчки состоят как бы из триплетов. При нарушении целостности релевантных триплетов строчка рассматривается как неверная.

Предъявление стимульного материала производилось при помощи специально написанной для данного исследования компьютерной программы (язык программирования Python).

Время экспозиции каждой буквенной последовательности в обучающей серии составляло 4 сек, после чего появлялась новая последовательность. В контрольной серии время экспозиции составляло 7 сек. Если испытуемый считал, что последовательность подчиняется правилам, то нажимал клавишу «ДА», если не подчиняется – клавишу «НЕТ». Ответ можно было дать в любой момент, как только последовательность появилась на экране, или в течение 3 сек после ее исчезновения (время ожидания ответа), после чего появлялась следующая буквенная последовательность. Последовательности, подчиняющиеся и нарушающие правила искусственной грамматики, следовали в случайном порядке.

Последовательности экспонировались на черном фоне, шрифт Calibri Light кегль 72, цвет шрифта белый. Каждая последовательность располагалась в центре экрана. Поскольку задание не предполагало фиксации времени или скорости реакции, точка фиксации взгляда и разметка мест расположения стимулов на мониторе отсутствовали.

Оценка результатов обучения производилась согласно предложенному Ребером варианту – исходя из определения случайного уровня угадывания. Так как в нашем тесте только два варианта ответа, порог вероятности случайного угадывания равнялся 50%.

Оценку параметров амплитуды ЭЭГ при имплицитном обучении проводили в сравнении с традиционным статистическим (эксплицитным) обучением, для чего использовали буквенные последовательности с очевидными закономерностями.

В исследовании приняли участие 40 испытуемых, средний возраст 20.3 ± 2.3 года, среди них 18 мужчин и 22 женщины. Все испытуемые были правшами. Для избегания эффектов переноса на выков, полученных при освоении имплицитного типа обучения на эксплицитное и наоборот, все испытуемые были разделены на 2 группы. Первую группу составили испытуемые, проходившие только имплицитное (20 чел.), вторую – только эксплицитное обучение (20 чел.).

В соответствии с моделью в экспериментальную схему были включены следующие функциональные пробы: 1) регистрация фоновой ЭЭГ-активности в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами, 2) имплицитное обучение (обучающая и контрольная серии), 3) эксплицитное обучение (обучающая и контрольная серии).

В процессе выполнения всех функциональных проб производилась запись ЭЭГ. Регистрацию ЭЭГ проводили с использованием энцефалографа-анализатора «MITSAR», производитель – ООО «Мицар» (Санкт-Петербург). Эпоха анализа составляла 20 секунд. Процедура анализа полученных записей заключалась в выделении коротких отрезков от момента появления буквенной последовательности до двигательного ответа. Далее из них формировалась 3 отрезка по 7 секунд каждый, в начале, середине и конце записи. В итоге получали фрагмент общей длительностью 20 секунд, который анализировали при помощи амплитудно-частотного анализа. Топографические карты, приложенные для визуализации гистограмм и графиков, отражают примерное распределение амплитуды того или иного ритма в различных областях коры головного мозга и не являются результатом прямого усреднения данных, полученных при имплицитном или эксплицитном обучении.

Перед обработкой данных ЭЭГ-исследования осуществлялось удаление окуло- и миографических артефактов, а также частотная фильтрация в диапазоне от 0.5 до 45 Гц. Обработка данных заключалась в построении спектров максимальной амплитуды для каждой пробы с использованием быстрого преобразования Фурье. Построение амплитудного спектра осуществлялось в следующих частотных диапазонах: Δ (0.5–4 Гц), Θ (4–8 Гц), α_1 (8–9.5 Гц), α_2 (9.5–11 Гц), α_3 (11–13 Гц), β_1 (13–24 Гц), β_2 (24–34 Гц). ЭЭГ регистрировали по 21 отведению, электроды располагались по схеме «10–20%».

Статистический анализ экспериментальных данных

Статистическая обработка данных ЭЭГ-исследования заключалась в оценке достоверности прямых межгрупповых отличий при выполнении функциональных проб. Все сравнения проводились с использованием дисперсионного анализа ANOVA. Анализировали влияние на ЭЭГ таких факторов, как *Группа*, *Группа/Область*, *Группа/Полушарие*, *Группа/Полушарие/Область*. Статистически достоверными признавались отличия с пороговой вероятностью ошибки первого рода 0.0125 и менее. Вычисления производились в программе SPSS 23.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты имплицитного обучения показывают, что в большинстве случаев испытуемые способны научиться имплицитно определять достоверность предложенных последовательностей и успешно справляются с тестированием (рис. 2), точность которого составила 60%. Точность

эксплицитного обучения при этом достоверно выше и составила 83%.

Прямые сравнения амплитудного спектра ЭЭГ-активности в процессе освоения различных видов обучения показывают, что для имплицитного обучения характерна повышенная амплитуда в диапазоне θ ритма, наиболее выраженная в передне-височных областях коры левого полушария (рис. 3).

В диапазоне α -ритма для имплицитного обучения характерна повышенная амплитуда во всех поддиапазонах. В α_1 - и α_2 -поддиапазонах данные изменения локализуются в передних областях коры (фронтальные, передне-височные) (табл. 1), в α_3 -поддиапазоне – в теменно-затылочных областях (рис. 4).

В наиболее высокочастотном β_2 -диапазоне имплицитное обучение реализуется на фоне повышенной амплитуды данного ритма, особенно значительно выраженной в теменно-затылочных и частично во фронтальных областях коры (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки эффективности имплицитного обучения нужно учитывать сложность и тип предъявляемых стимулов. В нашем исследовании в качестве стимулов выступали буквенные последовательности, представляющие собой зрительный стимул, относящийся к типу графем.

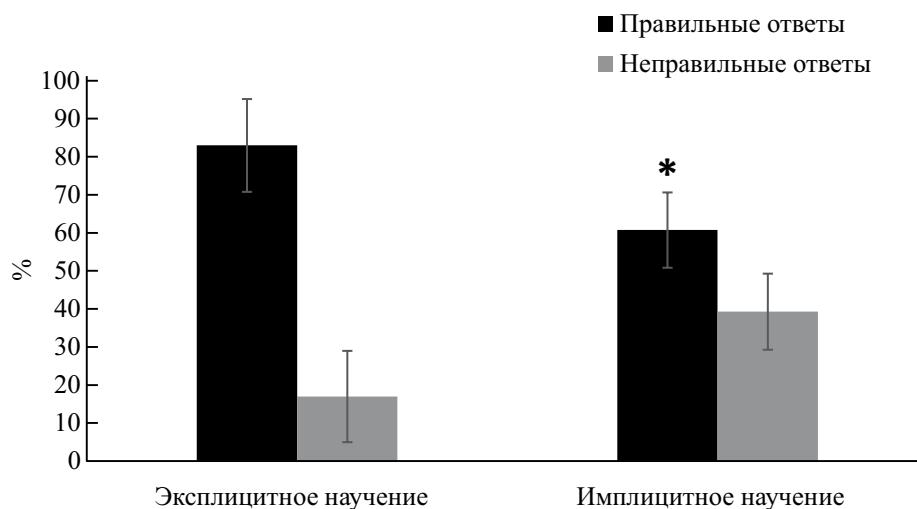


Рис. 2. Процент правильных и неправильных ответов при различных видах обучения. Примечания: * – $p < 0.05$ – обозначены достоверные отличия от эксплицитного обучения.

Fig 2. Results of different types of learning in the studied groups. Notes: * – significant differences from explicit learning.

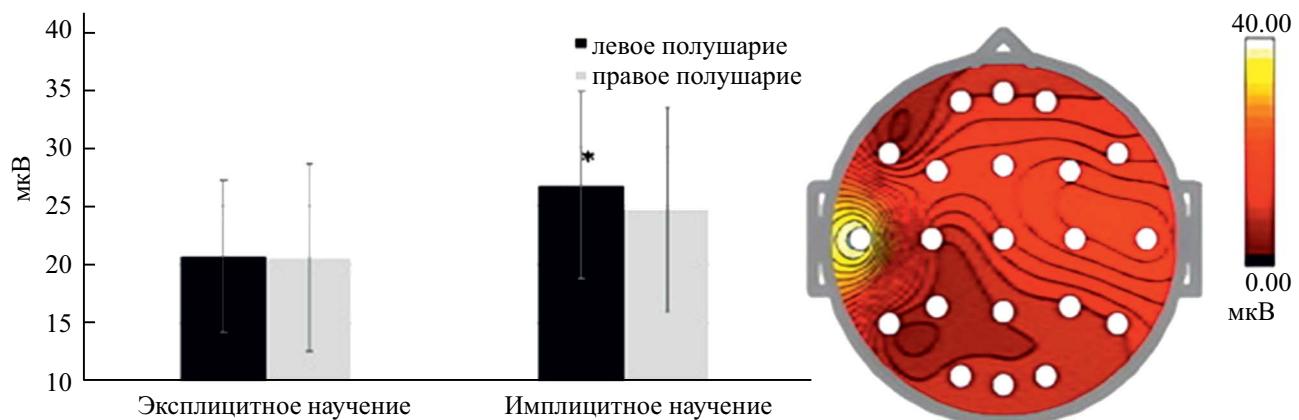


Рис. 3. Сравнение амплитуды θ -ритма при различных видах обучения. Примечания: * – $p < 0.009$ – обозначены достоверные отличия от эксплицитного обучения. Сравнение по факторам Группа/Область/Полушарие.

Fig 3. Comparison of the amplitude of the θ -rhythm during the different types of learning. Notes: comparison by factors Group/Region/Hemisphere.

Таблица 1. Сравнение амплитуды α 1- и α 2-ритмов при разных видах научения**Table 1.** Comparison of the amplitude of the α 1-rhythm and α 2-rhythm during the different types of learning.

Область	α 1-ритм (мкВ) $M \pm SD$		α 2-ритм (мкВ) $M \pm SD$	
	эксплицитное научение	имплицитное научение	эксплицитное научение	имплицитное научение
Орбитофронтальная (Fp1-Fp2)	7.1 \pm 2.7	10.6 \pm 7.7*	7.7 \pm 2.8	10.5 \pm 7.6*
Передневисочная (F7-F8)	6.7 \pm 3.1	8.5 \pm 3.0*	6.6 \pm 3.0	8.9 \pm 3.4*
Фронтальная (F3-F4)	6.7 \pm 2.3	8.4 \pm 2.9	6.6 \pm 2.4	8.7 \pm 3.5*
Средневисочная (T3-T4)	5.1 \pm 2.1	5.6 \pm 2.1	5.6 \pm 2.7	6.6 \pm 3.1
Центральная (C3-C4)	7.1 \pm 2.5	7.3 \pm 2.7	7.8 \pm 3.0	8.7 \pm 4.7
Задневисочная (T5-T6)	6.7 \pm 2.9	6.8 \pm 1.9	7.5 \pm 3.2	7.8 \pm 3.0
Теменная (P3-P4)	7.4 \pm 2.4	7.5 \pm 2.2	8.5 \pm 3.3	9.4 \pm 4.2
Затылочная (O1-O2)	7.9 \pm 2.1	8.6 \pm 3.0	8.5 \pm 2.4	9.5 \pm 3.7

Примечания: * – $p < 0.005$ – обозначены достоверные отличия от эксплицитного научения. Сравнение по факторам Группа/Область.

Notes: * – significant differences from explicit learning. Comparison by factors Group/Region, $p < 0.05$

Для визуальных стимулов графем, подчиняющихся неявным для сознательного восприятия правилам, точность распознавания не превышает значения 70% (Goujon et al., 2014), при этом механизмы, лежащие в основе выявления подобных закономерностей, до конца не изучены. По некоторым данным, важным процессом является развитие вероятностного предвосхищения предстоящих событий на основе выявленных закономерностей. Однако мозговые «схемы», лежащие в основе предвосхищения, не показаны (Altamura et al., 2014).

Сравнительный анализ амплитудного спектра ЭЭГ-активности при различных видах научения показывает, что для имплицитного научения

характерна повышенная амплитуда во всех поддиапазонах α -ритма. Изменения в данном частотном диапазоне рассматриваются большинством авторов как наиболее характерные маркеры внимания. При этом активацию внимания связывают с процессами десинхронизации α -ритма, в особенности в нижнем, α 1-поддиапазоне (Zhao et al., 2019). Повышенная синхронность α -ритма традиционно трактуется как признак развития тормозных процессов и снижение уровня функциональной активности коры (Долецкий и др., 2019). Это заставляет сделать предположение о том, что имплицитное обучение реализуется на фоне пониженного уровня функциональной активности систем, связанных с вниманием.

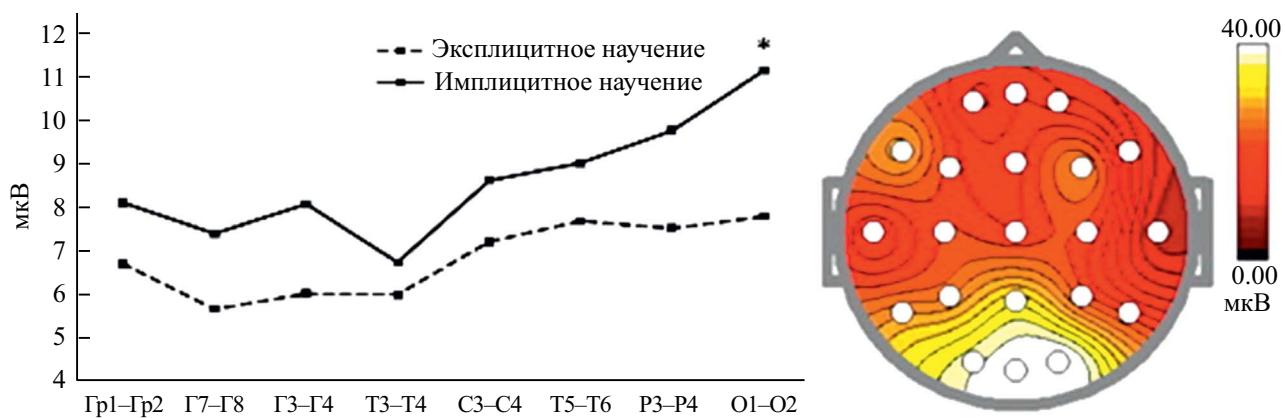


Рис. 4. Сравнение амплитуды α 3-ритма при различных видах научения. Примечания: * – $p < 0.01$ – обозначены достоверные отличия от эксплицитного научения. Сравнение по факторам Группа/Область.

Fig 4. Comparison of the amplitude of the α 3-rhythm during the different types of learning. Notes: comparison by factors Group/Region.

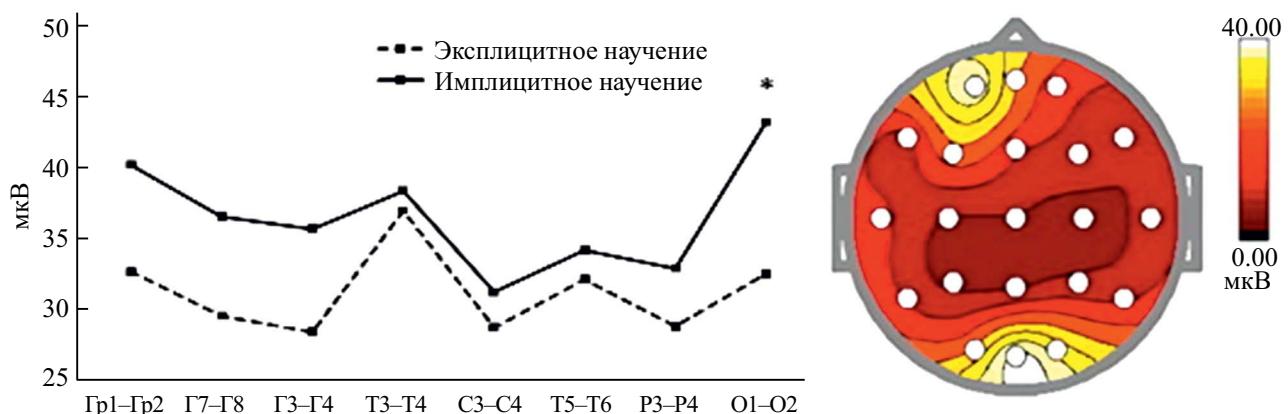


Рис. 5. Сравнение амплитуды β_2 -ритма при различных видах обучения. Примечания: * – $p < 0.01$ – обозначены достоверные отличия от эксплицитного обучения. Сравнение по факторам Группа/Область.

Fig 5. Comparison of the amplitude of the β_2 -rhythm during the different types of learning. Notes: comparison by factors Group/Region.

Однако представление о десинхронизации α -ритма как о ведущем механизме активации внимания справедливо только в отношении деятельности, протекающей при доминирующем внимании к внешним стимулам. Если внимание направлено на «внутренние» процессы, синхронность α -ритма возрастает (Русалова, 2003). По мнению некоторых авторов, на основе синхронизации α -ритма могут выстраиваться процессы взаимодействия проекционных, ассоциативных и подкорковых образований на макроуровне, что способствует более эффективной обработке поступающей информации (Altamura et al., 2014; Bianco et al., 2022). Применительно к нашему исследованию обработка информации может заключаться в активации процессов восприятия и первичного анализа предложенных стимулов с последующим выявлением релевантных (правильных) последовательностей.

На активацию крупномасштабных нейронных сетей также могут указывать отличия в диапазоне θ -ритма. Имплицитное обучение реализуется на фоне повышенной амплитуды данного ритма. Повышенная синхронность θ -диапазона ассоциируется с функциями передачи информации и координации процессов ее обработки в удаленных областях мозга на длительных интервалах времени (Kayser et al., 2012). Это позволяет интегрировать сенсорные данные и следы памяти, связанные с решением подобных задач в прошлом (von Stein, Sarnthein, 2000). Активация данной системы может быть связана с субъективной сложностью предложенного задания, подобные изменения часто фиксируются при усложнении или усилении воздействующего афферентного потока, обработке противоречивой информации (Giller et al., 2020) или информации, требующей

альтернативных ответов (Wu et al., 2022). Все это, в конечном счете, способствует лучшему восприятию и повышает качество анализа плохо распознаваемых, но значимых сенсорных сигналов.

Рост амплитуды данного ритма также может быть связан с координацией процессов по обнаружению и коррекции ошибок, при этом рост наиболее выражен при совершении большего количества ошибок (Arrighi et al., 2016). Подобные изменения, по мнению некоторых авторов, могут быть связаны с процессами обучения методом проб и ошибок (Mutha et al., 2011; Karakaş, 2020). Данное предположение хорошо сочетается с результатами нашего исследования, среднее количество ошибок в котором составляет 40%.

Особое внимание привлекает преимущественное вовлечение в данный процесс височных областей левого полушария. Подобные изменения фиксируются многими исследователями. В частности, решение задач, связанных с анализом абстрактных фигур, организованных в повторяющиеся тройки и содержащих зрительные закономерности, приводит к выборочной активации височных и затылочных отделов коры (визуальных сетей высокого уровня) (Turk-Browne et al., 2009). По мнению Rieckmann с соавторами (Rieckmann et al., 2010), височные области поддерживают быстрое начальное приобретение ассоциаций более высокого порядка в сложных последовательностях, а также могут отражать активацию процессов прогнозирования релевантных последовательностей (Altamura et al., 2014; Bianco et al., 2022; Yang et al., 2023).

Возможным результатом работы данных сетей является формирование прогноза, на основе которого строится процесс обучения. Однако в связи с недостаточным вовлечением в данный процесс

корковых осцилляторов ЭЭГ-активности он характеризуется низкой точностью и инвариантностью, а также возникает эффект неосознанности результатов обучения.

В наиболее высокочастотных α 3- и β 2-диапазонах имплицитное обучение также реализуется на фоне повышенной амплитуды данных ритмов, наиболее выраженной в теменно-затылочных и частично во фронтальных областях коры.

Повышенную активность в теменно-затылочных областях коры можно объяснить спецификой выполняемой деятельности, связанной с активацией процессов зрительного восприятия. Увеличение амплитуды высокочастотных ритмов при активации зрительного внимания показано многими исследователями. В частности, в период ожидания стимула рост амплитуды β -ритма обнаруживается в различных структурах зрительного анализатора (латеральное коленчатое ядро, латерально-задний ядерный комплекс, первичная и медиальная надсильвиева зрительная кора) как у животных, так и у людей. Краткие визуальные стимулы воспринимаются испытуемыми только в случае, если им предшествует высокая амплитуда бета-диапазона. Для лиц, способных эффективно удерживать внимание, также характерна повышенная амплитуда бета-диапазона. Более быстрая реакция на целевые зрительные стимулы сочетается с более высокой амплитудой ЭЭГ в β -диапазоне в теменно-затылочных областях (Dou et al., 2022).

По мнению некоторых авторов, при выполнении задач, требующих повышенного внимания, высокая амплитуда β -диапазона вызывает подпороговую деполяризацию в структурах зрительной системы и увеличивает их чувствительность к визуальным стимулам. Такой модулирующий механизм характерен для всех сенсорных систем и может лежать в основе многих феноменов, описываемых как внимание или бдительность (Wróbel, 2022).

Кроме того, повышенная амплитуда в данном частотном диапазоне может быть связана с необходимостью долгосрочного удержания в памяти ранее выявленной релевантной буквенной последовательности (правильного расположения букв в последовательности). Некоторыми авторами показано, что мощность β -ритма коррелирует с показателем запоминания через 15 минут после первоначального обучения (Pollock et al., 2014; Heideman et al., 2018).

Применительно к нашему исследованию активация теменно-затылочных областей, вероятно, отражает процессы ожидания и подготовки к появлению правильной последовательности. Эти данные согласуются с результатами различных электро- и нейрофизиологических исследований (Chi et al., 2006; Seidler et al., 2005; González-García, Biyu,

2021; Lee et al., 2021), в которых сообщалось, что теменно-затылочные области вовлекаются в процесс перцептивного предвосхищения, вызванного имплицитным обучением.

Высокая активность лобных областей, в свою очередь, может быть связана с активацией процессов, поддерживающих принятие решения о правильном расположении букв в последовательности (Храмов и др., 2021). Традиционно считается, что активность в β -диапазоне при принятии решений отражает только двигательную подготовку, основанную на сенсорной информации. Однако ряд исследований указывает на более прямую связь β -активности с формированием решений, независимо от конкретной двигательной активности (Spitzer, Haegens, 2017).

Таким образом, можно предположить, что имплицитное обучение строится на основе взаимодействия двух относительно независимых нейронных сетей мозга. Лобно-височные отделы коры и осцилляторные системы θ - и α 1-частотных диапазонов обеспечивают процессы обработки информации и выявление релевантных последовательностей, тогда как теменно-затылочные отделы и осцилляторные системы β 2- и α 3-ритмов, вероятно, обеспечивают процессы ожидания и подготовки ответной реакции на релевантные последовательности и игнорирование нерелевантных. С процессами выявления релевантных буквенных последовательностей наиболее специфично связаны изменения в диапазоне θ -ритма. Именно на его основе происходит интеграция сенсорных сигналов и следов памяти при обработке противоречивой, субъективно сложной информации, что, в конечном счете, приводит к формированию прогноза, на основе которого строится процесс имплицитного обучения. Осцилляторная активность в более высокочастотных α - и β -диапазонах, по всей видимости, в большей степени связана с активацией функций внимания и памяти, которые являются компонентами любой когнитивной деятельности.

ВЫВОДЫ

1. В диапазоне α -ритма амплитуда ЭЭГ при имплицитном обучении достоверно выше, чем при эксплицитном обучении, причем это различие наиболее выражено в лобно-височных областях коры.

2. В диапазоне θ -ритма для имплицитного обучения характерна повышенная амплитуда в передне-височных областях коры правого полушария.

3. В наиболее высокочастотном β 2-диапазоне для имплицитного обучения характерны повышенные показатели амплитуды в теменно-затылочных областях коры.

ВКЛАД АВТОРОВ

Баталова В.А., Кожевников С.П. – концепция и руководство работой, Кожевников С.П. – обсуждение результатов исследования, написание текста статьи, редактирование; Петров В.В., Абрамова С.Р. – проведение экспериментов, статистическая обработка данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в инициативном порядке, без финансовой поддержки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Чучалину Владиславу Владимировичу за написание компьютерной программы для экспозиции стимульного материала.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Протокол исследования одобрен Комитетом по биомедицинской этике ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России, протокол № 767с от 14.05.2024.

УКАЗАНИЕ НА ДОСТУПНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Первичные данные доступны по запросу у авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агафонов А.Ю., Крюкова А.П., Бурмистров С.Н. Имплицитное обучение искусственным грамматикам: установка vs обратная связь. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. 17(1–3): 620–625.

Крюкова А.П., Агафонов А.Ю., Бурмистров С.Н. Эффект переноса при селективном воспроизведении имплицитной последовательности. Российский психологический журнал. 2022. 19(1): 89–100.

Русалова М.Н. Функциональная асимметрия мозга и эмоции. Успехи физиологических наук. 2003. 34(4): 93–112.

Долецкий А.Н., Докучаев Д.А., Лата А.А. Трансформация взглядов на механизм генерации и физиологическую интерпретацию альфа-ритма ЭЭГ. Волгоградский научно-медицинский журнал. 2019. 1: 14–19.

Храмов А.Е., Максименко В.А., Фролов Н.С., Курин С.А., Грубов В.В., Бадарин А.А., Андреев А.В., Казанцев В.Б., С. Ю. Гордеева, Е.Н. Пицк, А.Н. Писарчик. Мониторинг состояния головного мозга человека в задачах принятия решений при восприятии стимулов. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2021. 29(4):603–634.

Altamura M., Carver F., Elvevåg B., Weinberger D., Coppola R. Dynamic cortical involvement in implicit anticipation during statistical learning. Neuroscience Letters. 2014. V.558: 73–77.

Arrighi P., Bonfiglio L., Minichilli F., Cantore N., Carbонcini M., Piccotti E., Rossi B., Andre P. EEG theta dynamics within frontal and parietal cortices for error processing during reaching movements in a prism adaptation study altering visuo-motor predictive planning. Journal PLOS ONE. 2016. 11(3): e0150265.

Baeuchl C., Hoppstädter M., Meyer P., Flor H. Contingency awareness as a prerequisite for differential contextual fear conditioning. Cognit. Affect. Behav. Neurosci. 2019. 19(4): 811–828.

Batterink L., Paller K. & Reber P. Understanding the neural basis of implicit and statistical learning. Topics in Cognitive Science. 2019. V.11: 482–503.

Bianco V., Finisguerra A., Ugesi C. Updating implicit contextual priors with explicit learning for the prediction of social and physical events. Brain and Cognition. 2022. V.160: 105876.

Chiu M-J., Hua M-S., Chen T-F., Hwu H-G., Kao C-H., Chen C-H. Brain responses of explicit and implicit memory: an event-related potential study. Neuroreport. 2006. V.17: 1483–1486.

Dou W., Morrow A., Iemi L., Samaha J. Pre-stimulus alpha-band phase gates early visual cortex responses. NeuroImage. 2022. V. 253: 119060.

Goujon A., Didierjean A., Poulet S. The emergence of explicit knowledge from implicit learning. Mem Cognit. 2014. 42(2): 225–36.

Giller F., Bensmann W., Mückschel M., Stock A., Beste C. Evidence for a causal role of superior frontal cortex theta oscillations during the processing of joint subliminal and conscious conflicts. Cortex. 2020. V.132: 15–28.

González-García C., Biyu J He. A gradient of sharpening effects by perceptual prior across the human cortical hierarchy. J Neurosci. 2021. 41(1):167–178.

Heideman, S.G., van Ede F. & Nobre A.C. Temporal alignment of anticipatory motor cortical beta lateralization in hidden visual-motor sequences. European Journal of Neuroscience. 2018. 48(8), 2684–2695.

- Karakas S.* A review of theta oscillation and its functional correlates. *International Journal of Psychophysiology*. 2020. V.157: 82–99.
- Kayser C., Ince R.A.A., Panzeri S.* Analysis of slow (theta) oscillations as a potential temporal reference frame for information coding in sensory cortices. *PLOS Computational Biology*. 2012. 8(10): e1002717.
- Lee C.S., Aly M., Baldassano C.* Anticipation of temporally structured events in the brain. *eLife* 2021. 10: e64972.
- Lum J.A.G., Lammertink I., Clark G.M., Fuelscher I., Hyde C., Enticott P.G. & Ullman M.T.* Visuospatial sequence learning on the serial reaction time task modulates the P1 event-related potential. *Psychophysiology*. 2019. 56(2): e13292.
- Lum J.A.G., Clark G.M., Barhoun P., Hill A.T., Hyde C., Wilson P.H.* Neural basis of implicit motor sequence learning: Modulation of cortical power. *Psychophysiology*. 2023. 60(2): e14179.
- Meissner S.N., Krause V., Südmeier, M., Hartmann, C.J. & Pollok B.* The significance of brain oscillations in motor sequence learning: Insights from Parkinson's disease. *NeuroImage: Clinical*. 2018. V.20: 448–457.
- Meissner S.N., Krause V., Südmeier M., Hartmann C.J. & Pollok B.* Pre-stimulus beta power modulation during motor sequence learning is reduced in Parkinson's disease. *NeuroImage: Clinical*. 2019. V. 24: 102057.
- Mutha P., Sainburg R., Haaland K.* Critical neural substrates for correcting unexpected trajectory errors and learning from them. *Brain*. 2011. V.134: 3647–3661.
- Pollok B., Latz D., Krause V., Butz M. & Schnitzler A.* Changes of motor-cortical oscillations associated with motor learning. *Neuroscience*. 2014. V. 275: 47–53.
- Reber A.* Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*. 1967. V.77: 317–327.
- Rieckmann A., Fischer H., & Backman L.* Activation in striatum and medial temporal lobe during sequence learning in younger and older adults: Relations to performance. *Neuro Image*. 2010. V.50: 1303–1312.
- Schiff R., Ashkenazi P., Kahta S., Sasson A.* Stimulus variation-based training enhances artificial grammar learning. *Acta Psychologica*. 2021. V. 214: 103252.
- Seidler R.D., Purushotham A., Kim S-G, Ugurbil K., Willingham D., Ashe J.* Neural correlates of encoding and expression in implicit sequence learning. *Experimental Brain Research*. 2005. V.165:114–124.
- Silva S., Folia V., Inácio F., Castro S., Petersson K.* Modality effects in implicit artificial grammar learning: An EEG study. *Brain Research*. 2018. V.1687: 50–59.
- Sznabel D., Land R., Kopp B. & Kral A.* The relation between implicit statistical learning and proactivity as revealed by EEG. *Sci Rep*. 2023. 13(1):15787.
- Spitzer B., Haegens S.* Beyond the status quo: A role for beta oscillations in endogenous content (re)activation. *eNeuro*. 2017. 4(4):0170–17.
- Tzvi E., Verleger R., Münte T.F. & Krämer U.M.* Reduced alpha-gamma phase amplitude coupling over right parietal cortex is associated with implicit visuomotor sequence learning. *NeuroImage*. 2016. V.141: 60–70.
- Turk-Browne N., Scholl B., Chun M. & Johnson M.* Neural evidence of statistical learning: Efficient detection of visual regularities without awareness. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2009. V.21: 1934–1945.
- van der Cruijzen J., Manoochehri M., Jonker Z.D., Andriopoulou E.-R., Frenz M.A., Ribbers G.M., Schouten A.C. & Selles R.W.* Theta but not beta power is positively associated with better explicit motor task learning. *NeuroImage*. 2021. V.240: 118373.
- von Stein A., Sarnthein J.* Different frequencies for different scales of cortical integration: from local gamma to long range alpha/theta synchronization. *International Journal of Psychophysiology*. 2000. 38(3): 301–313.
- Wu J., Zhang M., Dang Q., Chang Q., Yuan Q., Zhang Z., Ding G., Lu C., Guo T.* Nonverbal cognitive control training increases the efficiency of frontal-subcortical collaboration for bilingual language control. *Neuropsychologia*. 2022. 169(3): 108204.
- Wróbel A.* Attentional activation in cortico-thalamic loops of the visual system. In: Werner, J.S., Chalupa, L.M. (Eds.). *New Visual Neurosciences*. 2022 MIT Press: 339–350 pp.
- Yang Lu, Xiuyan Guo, Xue Weng, Haoran Jiang, Huidan Yan, Xianting Shen, Zhengning Feng, Xinyue Zhao, Lin Li, Li Zheng, Zhiyuan Liu, Weiwei Men, Jia-Hong Gao.* Theta signal transfer from parietal to prefrontal cortex ignites conscious awareness of implicit knowledge during sequence learning. *J Neurosci*. 2023. 43(40):6760–6778.
- Zhao C., Guo J., Li D., Tao Y., Ding Y., Liu H., Song Y.* Anticipatory alpha oscillation predicts attentional selection and hemodynamic response. *Hum Brain Mapp*. 2019. V.40: 3606–3619.

PECULIARITIES OF EEG ACTIVITY PARAMETERS DURING IMPLICIT LEARNING OF ARTIFICIAL GRAMMAR RULES

V. A. Batalova, V. V. Petrov^a, S. R. Abramova^b, S. P. Kozhevnikov^{b, #}

^a*Sirius University of Science and Technology, Russia*

^b*Department of Physiology, Cell Biology and Biotechnology, Udmurt State University, Izhevsk, Russia*
[#]*e-mail: ksp55@yandex.ru*

We studied changes in the bioelectrical activity of the brain during implicit learning. The study showed that implicit learning is associated with an increase in amplitude in the α 1-, α 2- and θ -frequency ranges, mainly in the frontotemporal areas of the cortex. In the higher frequency β range, there is also an increase in amplitude, most significantly in the parieto-occipital and partially frontal areas of the cortex. The observed changes suggest that implicit learning is based on the interaction of two relatively independent neural networks in the brain. The frontotemporal cortex and α 1- and θ -frequency oscillatory systems are responsible for processing information and identifying relevant sequences. Whereas the parieto-occipital regions and the oscillatory systems of β 2- and α 3-rhythms are likely to provide processes for anticipating and preparing a response to relevant sequences and ignoring irrelevant ones.

Keywords: implicit learning, attention processes, EEG