
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

**РЕАКТИВНОСТЬ ЭЭГ ВО ВРЕМЯ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ СЛОВ
У ДЕТЕЙ ДОШКОЛЬНОГО И МЛАДШЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА**

© 2023 г. М. А. Начарова¹, *, Д. В. Начаров², В. Б. Павленко¹

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

²Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*E-mail: alikina93@gmail.com

Поступила в редакцию 18.06.2023 г.

После доработки 08.09.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

Проведен анализ связанных с событиями изменений спектра электроэнцефалограммы (ЭЭГ) во время слухового восприятия слов-существительных у 83 типично развивающихся детей в возрасте от 4 до 10 лет, в том числе 50 детей дошкольного возраста и 33 детей младшего школьного возраста. Выявлены межгрупповые различия — у детей дошкольного возраста в обработку слов в большей степени вовлечены нейронные системы, активность которых отражается в обширной десинхронизации альфа- и синхронизации тета-активности в лобных зонах левого полушария. Для реактивности ЭЭГ детей младшего школьного возраста свойственна двусторонняя и более выраженная тета-синхронизация, что указывает на повышенную интенсивность лексико-семантических операций, а также на снижение фоновой и рост вызванной тета-активности. У детей данной группы также наблюдалась синхронизация ЭЭГ в бета-диапазоне, представленная отдельными всплесками и наиболее выраженная в лобных отведениях, что характерно для более зрелых механизмов обработки речи. Результаты исследования важны для уточнения механизмов понимания речи у типично развивающихся детей дошкольного и младшего школьного возраста.

Ключевые слова: восприятие речи, дети дошкольного и школьного возраста, электроэнцефалограмма, тета-, альфа- и бета-активность

DOI: 10.31857/S0869813923100072, EDN: TDFUBW

ВВЕДЕНИЕ

Распознавание отдельных слов и ассоциирование их с конкретными объектами — это процесс, который возникает, как это экспериментально подтверждено, уже у полугодовалых младенцев [1] и активно развивается у детей раннего возраста [2]. Данный процесс лежит в основе формирования словарного запаса и адекватного речевого развития в целом [3, 4]. Исследования показывают, что развитие языковых способностей и созревание нейронных структур, лежащих в их основе, продолжается по меньшей мере до возраста 12 лет [5]. Нейрофизиологические механизмы становления рецептивной речи у детей активно изучаются с применением целого ряда методов, в том числе электроэнцефалографии. Было установлено, что процесс восприятия слов отражается в динамике мощности тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ, а также характеристиках компонентов связанных с событиями потенциалов (ССП), в частности N400 и P600 [5–7].

Одним из способов исследования процесса понимания слов является частотно-временной анализ ЭЭГ, в частности анализ связанных с событиями спектральных пертурбаций (СССП). Используя этот метод, можно определить изменения мощности ЭЭГ в различных частотных диапазонах во время выполнения языкового задания. Предполагается, что увеличение мощности в определенной частотной полосе связано с активацией дополнительных нейронных ансамблей, возбуждающихся на той же частоте [8]. Анализ СССП дает возможность оценить изменения классических ритмов ЭЭГ, функциональное значение которых достаточно хорошо изучено. Дополнительно отмечают, что этот метод позволяет обнаружить изменения в ЭЭГ, которые не выявляются при традиционном анализе ССП. Это преимущество подчеркнуто исследованием с участием детей школьного возраста [9], которое выявило при восприятии правильных и содержащих семантические ошибки предложений различия в реактивности тета-ритма, но не в параметрах ССП.

У детей и взрослых наиболее убедительно установлена связь процесса обработки слов с синхронизацией тета-ритма [5, 10–12]. Предполагается, что рост тета-активности с латентным периодом 150–200 мс от начала стимула связан с лексико-семантическими операциями поиска и извлечения слов из памяти при восприятии речевых сообщений [7]. Чем сложнее процесс этого поиска, тем больше растет мощность тета-ритма. Этим объясняют тот факт, что увеличение мощности указанного ритма больше при обработке псевдослов, чем реальных слов [13].

Несмотря на схожесть динамики тета-ритма при восприятии слов у детей и взрослых, появляется все больше свидетельств того, что амплитуда и топография тета-синхронизации меняются с возрастом [9]. Например, дети 10 лет во время чтения слов демонстрируют более выраженное по сравнению со взрослыми увеличение тета-активности в правом полушарии [14], а в 12-летнем возрасте правополушарная синхронизация тета-активности значительно уменьшается [7].

Наряду с синхронизацией тета-активности наблюдается десинхронизация альфа-ритма ЭЭГ, которая может отражать как активацию процессов внимания [15], так и специфически связанные с восприятием речи процессы [16]. Так, было показано, что восприятие речевых сигналов вызывает более значимую десинхронизацию альфа-ритма в центральных областях коры по сравнению с восприятием неречевых стимулов [17]. В то же время некоторыми исследователями был обнаружен рост мощности мю- и альфа-ритма в центральных, теменных и затылочных регионах в процессе восприятия предложений у детей 2–3 [18] и 10–12 лет [5]. Данный феномен связывают с активацией процессов рабочей памяти при восприятии целостного речевого сообщения.

Также отмечается увеличение мощности бета-ритма в обширных областях неокортекса, которое, как предполагают [10, 11, 19, 20], отражает поддержание активного состояния нейронных сетей, участвующих в процессах восприятия речи. В отдельных исследованиях [16] выявлен как рост мощности бета-ритма в височных и теменных областях, так и ее снижение над моторными областями неокортекса. Указанное снижение связывают с процессами активации моторного репертуара речи.

В то время как реактивность ЭЭГ во время восприятия речи у взрослых относительно хорошо изучена [10–12, 16], исследования с участием детей по-прежнему немногочисленны. Кроме этого, в большинстве работ изучается процесс чтения слов и предложений у детей школьного возраста [7, 21]. Такое исследование невозможно провести у детей более раннего возраста в связи с отсутствием у них навыка чтения. Однако выявление изменений в становлении процесса восприятия речи у детей дошкольного возраста является актуальным в связи с ростом числа детей с речевыми нарушениями [22].

Целью настоящего исследования является анализ СССП во время слухового восприятия слов у типично развивающихся детей 4–10 лет, а также выявление возможных различий реакций ЭЭГ у детей дошкольного и младшего школьного возрастов. В качестве экспериментальной ситуации выбрано пассивное прослушивание слов, которое может выполняться детьми с нарушениями речи, испытывающими трудности в выполнении сложной инструкции.

Основываясь на результатах работ других авторов, можно предположить, что, как и у более старших детей и взрослых, восприятие слов участниками исследования 4–10 лет отражается в росте мощности тета-активности, а также преобладании десинхронизации альфа-ритма. Однако поскольку дети 7–10 лет, уже посещающие школу, могут использовать иные, более зрелые стратегии для успешной обработки речевых сигналов, чем дошкольники 4–6 лет, паттерны СССП этих возрастных групп будут существенно отличаться.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика выборки. В исследовании приняли участие 83 типично развивающихся ребенка (55 мальчиков и 28 девочек), представленных двумя группами — 50 детей дошкольного возраста (4–6 лет, средний возраст 5.2 ± 1.2 года, 31 мальчик и 19 девочек) и 33 — младшего школьного возраста (7–10 лет, средний возраст 8.6 ± 1.9 года, 24 мальчика и 9 девочек). Все дети были правшами, имели нормальные или приближающиеся к нормальным показатели зрения и слуха. В указанные группы не были включены дети с массой тела при рождении менее 2.5 кг, с наличием генетических заболеваний, а также те дети, в ЭЭГ которых во время клинических обследований были выявлены эпизоды эпилептиформной активности. Дети дали устное, а их родители — письменное согласие на участие в эксперименте, с процедурой которого они были заранее ознакомлены.

Регистрацию ЭЭГ проводили с помощью электроэнцефалографа Нейрон-Спектр-3 (“Нейрософт”, Россия) монополярно в соответствии с международной системой 10–20 в лобных (Fp_1 , Fp_2 , Fz , F_3 , F_4 , F_7 , F_8), центральных (Cz , C_3 , C_4), височных (T_3 , T_4 , T_5 , T_6), теменных (Pz , P_3 , P_4) и затылочных (O_1 , O_2) отведениях. В качестве референтного использовался объединенный ушной электрод. Сопротивление электродов не превышало 5 кОм. Частота дискретизации составляла 500 Гц.

Испытуемых просили сидеть спокойно, глядя перед собой, и внимательно слушать аудиозапись речи. При этом использовали акустические колонки, находящиеся на расстоянии около двух метров от ребенка. Громкость звука в этой области в среднем составляла 85 дБ. В качестве стимулов были подобраны 30 часто употребляемых конкретных слов-существительных, знакомых детям четырех лет (мяч, яблоко, карандаш и т.п.). Средняя продолжительность слов составляла 296 ± 84 мс, а межстимульный интервал — 4500–5500 мс. Перед началом регистрации ЭЭГ несколько слов воспроизводили в тестовом режиме с целью дать возможность ребенку освоиться с таким способом предъявления речевых сигналов и убедиться, что он не повторяет слов вслух.

Анализ ЭЭГ-данных проводили с помощью программы EEGLAB (<http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/>). Записи ЭЭГ были отфильтрованы в диапазоне от 1 до 50 Гц, артефакты удалялись с помощью метода анализа независимых компонент. Непрерывную запись ЭЭГ разбивали на эпохи длительностью 4000 мс, соответствующие моментам предъявления стимулов. Предстимульный (фоновый) интервал имел длительность 1000 мс, постстимульным интервалом являлся отрезок времени длительностью 3000 мс от момента начала предъявления слова. СССП ЭЭГ выявляли с помощью частотно-временного анализа на основе вейвлета Морле. Показатели СССП рассчитывали как логарифм отношения мощностей ритми-

ческих диапазонов постстимульной и предстимульной ЭЭГ. Отрицательные значения СССР соответствуют десинхронизации ЭЭГ и отмечены на графиках синим цветом, положительные значения — синхронизации, отмечены на графиках красным цветом. Частотное разрешение составило 0.6 Гц. Временное разрешение составило 14.7 мс и рассчитывалось как отношение длительности анализируемого интервала (3000 мс с учетом исключения краевых эффектов) и количества отсчетов (200 отсчетов). В качестве тета-, альфа- и бета-активности у детей дошкольного возраста рассматривали активность в частотных диапазонах 3–7, 7–12, 13–25 Гц, а у школьников — 3–8, 8–13, 13–30 Гц [23].

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных программ MATLAB и набора инструментов EEGLAB.

Для оценки значимости связанных с прослушиванием слов реакций ЭЭГ в общей выборке детей дошкольного и младшего школьного возраста и внутри каждой из групп использовали многофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями (repeated measures ANOVA) с факторами СИТУАЦИЯ (два уровня — до и после предъявления слов), ЛОКУС (19 отведений ЭЭГ), ЧАСТОТА (52 значения от 1 до 30 Гц). Анализ выполнялся для каждого из 170 временных отсчетов постстимульной ЭЭГ, в качестве данных предстимульной ЭЭГ использовалось усредненное значение данных 30 отсчетов предстимульной ЭЭГ. Для дальнейшего анализа использовали только те временные интервалы, в которых общий эффект взаимодействия всех трех факторов достигал уровня статистической значимости ($p < 0.05$ с учетом поправки Хьюнха–Фельдта). Для попарных сравнений СССР до и после стимула использовали апостериорные t -тесты ($p < 0.01$).

Одним из достоинств программы EEGLAB является возможность межгруппового сравнения СССР с помощью пермутационной статистики (статистики перестановок). Пермутационная статистика рекомендована для анализа больших наборов данных, таких как результаты частотно-временного анализа ЭЭГ, поскольку может использоваться вне зависимости от соответствия распределения данных тому или иному закону, относительно надежна при анализе экспериментов с участием небольшого количества испытуемых, не требует применения дополнительных поправок [24]. Пермутационная статистика была применена нами при оценке различий СССР в группах детей дошкольного и младшего школьного возраста. Для каждого канала и точки частотно-временной области на основе метода перестановок генерировалась искусственная выборка, сформированная в результате случайных перестановок данных исходной выборки (дети дошкольного и младшего школьного возрастов), рассчитывалась t -статистика для полученной выборки. Путем повторения данной операции 2000 раз формировалось нулевое распределение, состоящее из 2000 статистик искусственно сгенерированных выборок. Далее статистики исходных выборок сравнивались с полученным нулевым распределением. Значимыми считались различия при $p < 0.01$ — в этом случае статистики исходной выборки входили в 0.5% наибольших или 0.5% наименьших значений нулевого распределения [25]. В противном случае принималась нулевая гипотеза, делался вывод об отсутствии различий данных в группах детей разных возрастов в определенном отведении и точке частотно-временной области. Дополнительная коррекция на множественные измерения не проводилась, однако интерпретировались частотно-временные кластеры, содержащие не менее 50 пикселей. Преимущества проведения расчетов для каждой точки частотно-временной области заключается в учете возможного различия в распределении параметров ЭЭГ на разных частотах и в разные временные промежутки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ связанных с событием спектральных пертурбаций общей выборки детей 4–10 лет. Анализ СССП у всех 83 типично развивающихся детей дошкольного и младшего школьного возраста позволил оценить общий паттерн реактивности ЭЭГ при восприятии ими слов-существительных. Было выявлено увеличение мощности ЭЭГ по сравнению с фоновым уровнем в диапазоне тета-активности во временном интервале 200–800 мс после начала стимула в лобных, центральных и височных отведениях, наиболее выраженное в отведениях Fp_1 , F_7 , F_8 (рис. 1). Наблюдалась десинхронизация активности в альфа- и бета-диапазонах, наиболее выраженная в лобных и центральных зонах.

Дисперсионный анализ с повторными измерениями в группе детей 4–10 лет выявил значимое влияние взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ, ЛОКУС и ЧАСТОТА для временных промежутков 0–103, 308–1102 мс.

Результаты апостериорного анализа в группах детей 4–10 и 4–6 лет представлены в табл. 1.

Анализ связанных с событием спектральных пертурбаций в группе детей дошкольного возраста. Анализ СССП в группе типично развивающихся детей 4–6 лет показал увеличение мощности ЭЭГ в диапазоне тета-активности, наиболее выраженное в отведениях Fp_1 , F_7 , F_8 (рис. 2а). Наблюдалась десинхронизация активности в альфа- и бета-диапазонах, наиболее выраженная в лобных и центральных зонах.

Дисперсионный анализ с повторными измерениями в группе детей 4–6 лет выявил значимое влияние взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ, ЛОКУС и ЧАСТОТА для временного промежутка 1617–1764 мс.

Несмотря на выраженную синхронизацию тета-активности в лобных и височных локусах левого полушария, применение поправки Хьюнха–Фельдта показало, что различия с предстимульной активностью не достигли уровня статистической значимости. Зарегистрирована достигающая уровня статистической значимости десинхронизация альфа- и бета-активности (табл. 1).

Анализ связанных с событием спектральных пертурбаций в группе детей младшего школьного возраста. Во время прослушивания слов в группе детей младшего школьного возраста зарегистрирована синхронизация ЭЭГ в тета-диапазоне в лобных, центральных, теменных и височных отведениях; синхронизация альфа- и бета-активности (рис. 2б).

Дисперсионный анализ с повторными измерениями в группе детей 7–10 лет не выявил значимое влияние взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ, ЛОКУС и ЧАСТОТА, что может быть связано с относительно небольшим объемом выборки и коррекцией уровня значимости с применением поправки Хьюнха–Фельдта.

Сравнение связанных с событием спектральных пертурбаций ЭЭГ в группах детей дошкольного и младшего школьного возраста. Во время восприятия слов в группах детей дошкольного и младшего школьного возраста выявлены значимые различия между реактивностью ЭЭГ в тета-, альфа- и бета-диапазонах (рис. 2).

В группе детей школьного возраста в отведении F_4 регистрируется более выраженная синхронизация тета-активности через 108–380 мс по сравнению с показателями в группе детей дошкольного возраста ($p < 0.01$). Аналогичные изменения зарегистрированы в отведениях Fp_1 во временном интервале 1055–1200 мс и в Fp_2 через 1130–1218 мс после начала стимула. В отведении C_3 через 10–250 мс и P_4 через 610–740 мс наблюдается синхронизация тета-активности, тогда как у детей дошкольного возраста – десинхронизация. В отведении T_3 на промежутке 1850–2050 мс и в локусе T_5 через 1150–1300 и 2200–2500 мс регистрируется десинхронизация тета-активности, сменяющая предшествующую синхронизацию, тогда как у детей дошкольного возраста продолжается синхронизация тета-активности.

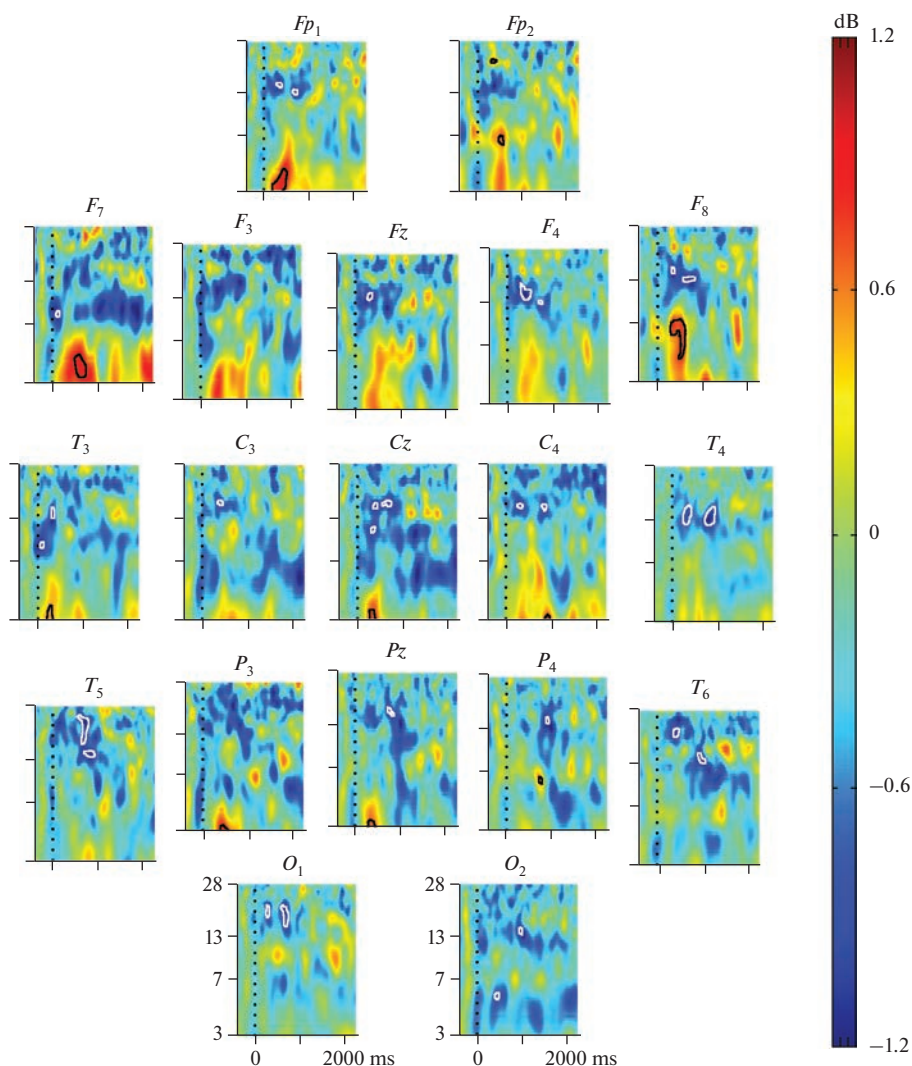


Рис. 1. Связанные с прослушиванием слов спектральные пертурбации в 19 отведениях ЭЭГ у 83 типично развивающихся детей в возрасте 4–10 лет. Каждый фрагмент рисунка соответствует временному промежутку от –500 до 2500 мс от начала стимула (момент 0) и диапазону частот от 3 до 28 Гц. Закрытыми белыми линиями выделены участки графика со статистически значимым снижением, черными – повышением мощности ЭЭГ относительно предстимульного интервала. Шкала в правой части рисунка отражает логарифм отношения мощностей постстимульной и предстимульной ЭЭГ в дБ.

В группах детей дошкольного и младшего школьного возраста выявлены значимые различия в реактивности альфа-ритма во время восприятия слов в отведениях Fp_1 , Fp_2 , Fz , F_4 , F_7 , F_8 , T_5 , C_4 , P_3 , O_2 . У детей дошкольного возраста наблюдалась десинхронизация альфа-активности, тогда как у детей школьного возраста – синхронизация.

Значимые различия в реактивности бета-ритма выявлены в отведениях Fp_1 , Fp_2 , Fz , F_3 , F_4 , F_7 , F_8 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , Cz , C_3 , C_4 , P_3 , O_1 , O_2 . У детей дошкольного возраста наблюдалась десинхронизация бета-активности, тогда как у детей школьного возраста – синхронизация.

Таблица 1. Отведения ЭЭГ и временные интервалы (мс), в которых выявлены статистически значимые, связанные с прослушиванием слов спектральные пертурбации

Реактивность ЭЭГ	Отведения	Реактивность в группе 4–10 лет, мс	Реактивность в группе 4–6 лет, мс
Синхронизация тета-активности	Fp_1	308–704	
	Fp_2	601–675	
	F_7	702–938	
	F_8	366–703	
	Cz	335–496	
	C_4	1070–1102	
	Pz	350–584	
	P_3	454–660	
	P_4	894–909	
	T_3	308–367	
Десинхронизация тета-активности	C_3	0–45	
	O_2	513–615	
Десинхронизация альфа-активности	Fp_1		1690–1764
	F_7	28–103	1617–1764
	F_8	630–923	
	Cz	352–441	1617–1764
	T_3	0–103	
	T_6		1617–1690
Синхронизация бета-активности	Fp_2	439–542	
Десинхронизация бета-активности	Fp_1	308–396, 733–880	1617–1764
	Fz	365–511	
	F_4	337–645, 850–908	
	F_8	320–438, 657–949	
	Cz	394–525, 657–876	
	C_3	469–557	
	C_4	410–527, 1026–1102	
	Pz	803–1102	
	P_4	1022–1102	
	T_3	337–366	
	T_4	308–527, 803–1102	
	T_5	770–1022	
	T_6	441–588, 1020–1102	
	O_1	337–469, 733–952	
	O_2	1099–1102	

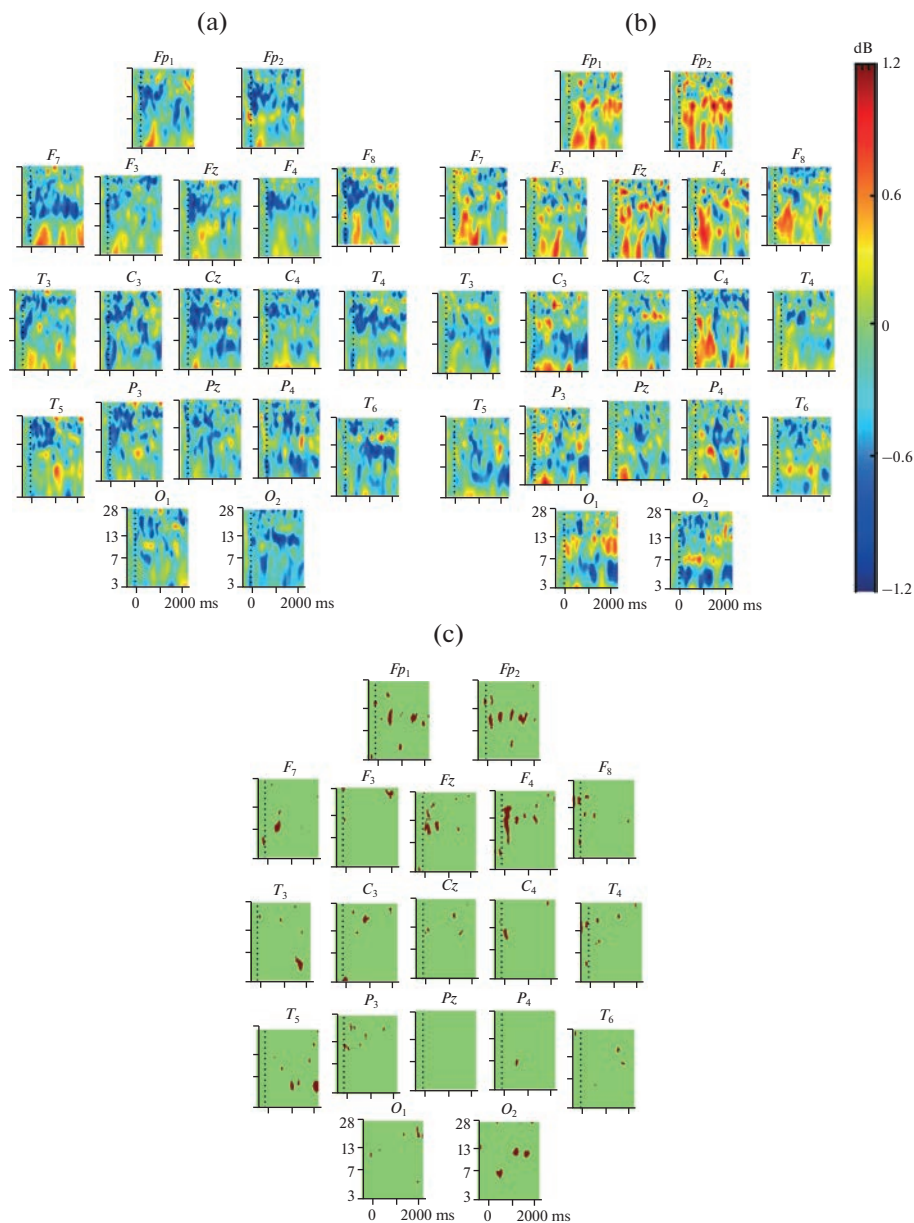


Рис. 2. Связанные с прослушиванием слов спектральные пертурбации в 19 отведениях ЭЭГ у 53 типично развивающихся детей в возрасте 4–6 лет (а), 30 типично развивающихся детей в возрасте 7–10 лет (б), межгрупповые различия, $p < 0.01$ (с). Каждый фрагмент рисунка соответствует временному промежутку от –500 до 2500 мс от начала стимула (момент 0) и диапазону частот от 3 до 28 Гц. Шкала отражает логарифм отношения мощностей постстимульной и предстимульной ЭЭГ в дБ. Межгрупповые различия при $p < 0.01$ выделены темным цветом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты настоящего исследования подтвердили данные о более широкой пространственной представленности процессов синхронизации ЭЭГ в тета-диапазоне во время восприятия слов у детей по сравнению со взрослыми [5, 7]. Так, значимый рост мощности тета-активности у детей 4–10 лет наблюдается не только в лобных и теменных отведениях левого полушария, но и в височных и центральных зонах обоих полушарий (рис. 1). Аналогичные особенности динамики ЭЭГ в тета-диапазоне, в частности менее локализованная тета-синхронизация, представленная как в левом, так и в правом полушариях, обнаружены во время обработки речи у детей в ряде других исследований [7, 26–28].

При разделении детей 4–10 лет на группы дошкольного (4–6 лет) и младшего школьного возраста (7–10 лет), как и предполагалось, были выявлены различия в паттернах ЭЭГ во время слухового восприятия слов (рис. 2). У детей дошкольного возраста наиболее выраженная тета-синхронизация происходила в лобных и височных отведениях левого полушария (рис. 2а). У детей 7–10 лет тета-синхронизация была более выраженной и затрагивала не только зоны левого полушария, но и правосторонние области (рис. 2б).

Большее вовлечение правого полушария в процессы восприятия речи в группе школьников по сравнению с детьми дошкольного возраста оказалось неожиданным результатом. Действительно, хотя в исследованиях динамики ЭЭГ в процессе восприятия слов у детей 8–12 лет и подчеркивается роль правого полушария [7], авторы указывают на значительное снижение правосторонней синхронизации тета-активности у более старших из обследованных детей. Следует отметить, что в указанной работе, как и в большинстве исследований, применявших анализ СССРП при восприятии речи, дети школьного возраста читали слова, тогда как в нашем исследовании исследовалось слуховое восприятие слов. Несмотря на то, что нейронные сети чтения и слухового восприятия речи частично перекрываются, прослушивание слов требует дополнительного анализа просодических компонентов речи, обработка которых в большей степени происходит в правом полушарии [29–31].

В целом, большую выраженность СССРП в тета-диапазоне у детей школьного возраста, по сравнению с дошкольниками, можно объяснить следующим образом. Поскольку увеличение мощности тета-ритма при восприятии речи связывают, как уже отмечалось, с лексико-семантическими операциями поиска и извлечения слов из памяти [7], рост тета-активности может указывать на большую интенсивность указанных операций у старших детей. Кроме того, различия в выраженности СССРП в тета-диапазоне у детей дошкольного и младшего школьного возраста могут быть следствием разного уровня предстимульной (фоновой) тета-активности. В ряде исследований [13, 32] фоновую активность в тета-диапазоне рассматривают как “тоническую”, а ее изменения, связанные с обработкой стимула, как “фазическую” активность. Чем ниже тоническая тета-активность, тем выше готовность к восприятию информации, успешнее выполнение когнитивных операций. Амплитуда тонической тета-активности снижается у детей по мере взросления, отражая процесс созревания головного мозга [33, 34]. Таким образом, большая реактивность у детей школьного возраста в тета-диапазоне, отражающая фазическую активность, может быть обусловлена более низким уровнем предстимульной тонической тета-активности у детей этой группы.

В нашем исследовании особенностью реактивности ЭЭГ у детей 4–6 лет явилась хорошо выраженная десинхронизация в альфа-диапазоне, наблюдающаяся практически во всех отведениях. Поскольку десинхронизация альфа-ритма отражает активацию соответствующих зон неокортекса [15], в том числе обеспечивающих процессы как произвольного, так и непроизвольного внимания, можно предполо-

жить, что детям этой группы при восприятии речи требуется привлекать больший, чем младшим школьникам, объем соответствующих мозговых ресурсов. Кроме этого, десинхронизация ЭЭГ в указанном частотном диапазоне, развивающаяся над двигательными областями коры, может быть связана с активацией у дошкольников моторных артикуляционных зон [35]. Поскольку по нашим наблюдениям при предварительном тестовом предъявлении сигналов именно дошкольники чаще стремились повторять слова вслух, они, вероятно, в большей степени опирались на механизмы внутреннего проговаривания слов, чем дети более старшего возраста.

У детей 7–10 лет десинхронизация альфа-активности носила менее выраженный характер и была не столь широко представлена в анализируемых отведениях. Мы предполагаем, что данная группа участников исследования, следуя инструкции внимательно слушать слова, в большей степени использовала ресурсы достаточно развитого в этом возрасте произвольного, чем непроизвольного внимания. Именно преобладание процессов произвольного внимания может приводить к более локальному вовлечению зон мозга в процесс обработки слов. Обращает на себя внимание и усиление мощности в альфа-диапазоне в лобных областях коры у младших школьников. Как показано у взрослых испытуемых [36], для выполнения задач, вовлекающих рабочую память, характерна синхронизация альфа-ритма в лобных зонах. Такую синхронизацию объясняют торможением ряда нейронных цепей, благодаря чему, в то время, когда выполняется непрерывная задача по извлечению информации из памяти, лобные области меньше вовлекаются в новые действия. Во время восприятия речевых сигналов поступающие звуки также запускают каскад операций извлечения из памяти, которые делают доступными фонологические, синтаксические и семантические свойства отдельных слов [11]. Таким образом, большая мощность ЭЭГ в альфа-диапазоне в лобных областях коры у детей 7–10 лет по сравнению с дошкольниками может указывать на формирование более зрелых, сходных с таковыми у взрослых, нейрофизиологических механизмов извлечения информации из памяти при восприятии речи.

Особо можно выделить десинхронизацию в альфа-диапазоне ЭЭГ, выявленную в центральных зонах неокортекса. Такая десинхронизация наблюдалась в отведениях Cz и C3 как в группе дошкольников, так и у младших школьников, причем, межгрупповых различий найдено не было. Десинхронизацию в указанных отведениях при восприятии речи рассматривают как реакцию разновидности альфа-ритма — мю-ритма, и ассоциируют с активацией моторных зон мозга, участвующих не только в процессах продукции речи, но и в ее понимании [35, 37–39]. Также вовлечение моторных зон в процесс восприятия слов-существительных может быть вызвано активацией моторного репертуара [16, 40], связанного с этими словами (мяч — пинать, бросать, ловить; карандаш — рисовать, держать, сжимать и т. д.).

Только в группе детей школьного возраста во время прослушивания слов наблюдалась синхронизация бета-ритма, представленная отдельными всплесками и наиболее выраженная в лобных отведениях (рис. 2b). Всплески бета-ритма, длящиеся всего несколько сотен миллисекунд, выявлены у взрослых при выполнении задач, требующих участия рабочей памяти [41]. Как считают, они отражают мгновенное обновление или реактивацию содержимого памятного следа. Вслед за другими авторами, сравнивавшими паттерны ЭЭГ при восприятии речи у детей и взрослых [5], мы также предполагаем, что по мере процесса взросления обработка речи у детей все в большей степени вовлекает мозговые механизмы, функционирование которых проявляется в реактивности бета-ритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ динамики ЭЭГ при восприятии слов у всей выборки детей дошкольного и младшего школьного возраста выявил увеличение мощности в диапазоне тета-активности во временном интервале 200–800 мс после начала стимула в лобных, центральных и височных отведениях обоих полушарий. Усиление тета-осцилляций сочеталось с двусторонней десинхронизацией активности в альфа- и бета-диапазонах, наиболее выраженной в лобных и центральных зонах.

У детей 4–6 лет процесс обработки слов отражается в охватывающей большинство отведений десинхронизации альфа-активности, более выраженной, чем у детей школьного возраста. Такие особенности паттерна реактивности ЭЭГ могут быть связаны с большим вовлечением ресурсов головного мозга для обеспечения требуемых процессов внимания, а также с активацией у дошкольников моторных артикуляционных зон.

Для реакций ЭЭГ детей 7–10 лет при восприятии слов свойственна более выраженная, чем у дошкольников, двусторонняя тета-синхронизация. Такие особенности реактивности ЭЭГ указывают на повышенную интенсивность лексико-семантических операций поиска и извлечения слов из памяти. Кроме того, у детей данной группы наблюдалась синхронизация бета-колебаний, представленная отдельными вспышками и наиболее выраженная в лобных отведениях. Таким образом, обработка речи у детей младшего школьного возраста частично вовлекает характерные для взрослых мозговые механизмы, функционирование которых проявляется в реактивности бета-осцилляций.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным комитетом по биоэтике Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (Симферополь), протокол заседания комитета № 10 от 4 ноября 2019 г.

Информированное согласие. Каждый родитель участника исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

ВКЛАД АВТОРОВ

М.А.Н. — набор и обработка данных, написание статьи. Д.В.Н. — обработка данных, написание статьи. В.Б.П. — планирование исследования, написание статьи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, ФГАОУ ВО “КФУ им. В.И. Вернадского”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tincoff R, Jusczyk PW* (2012) Six-month-olds comprehend words that refer to parts of the body. *Infancy* 17(4): 432–444.
<https://doi.org/10.1111/j.1532-7078.2011.00084.x>

2. *Valleau MJ, Konishi H, Golinkoff RM, Hirsh-Pasek K, Arunachalam S* (2018) An eye-tracking study of receptive verb knowledge in toddlers. *J Speech Lang Hear Res* 61(12): 2917–2933. https://doi.org/10.1044/2018_JSLHR-L-17-0363
3. *Fernald A, Marchman VA* (2012) Individual differences in lexical processing at 18 months predict vocabulary growth in typically developing and late-talking toddlers. *Child Dev* 83: 203–222. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01692.x>
4. *Ference J, Curtin S* (2015) The ability to map differentially stressed labels to objects predicts language development at 24 months in 12-month-olds at high risk for autism. *Infancy* 20: 242–262. <https://doi.org/10.1111/infa.12074>
5. *Schneider JM, Abel AD, Ogiela DA, McCord C, Maguire MJ* (2018) Developmental differences in the neural oscillations underlying auditory sentence processing in children and adults. *Brain Lang* 186: 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2018.09.002>
6. *Panda EJ, Emami Z, Valiante TA, Pang EW* (2021) EEG phase synchronization during semantic unification relates to individual differences in children's vocabulary skill. *Dev Sci* 24(1): e12984. <https://doi.org/10.1111/desc.12984>
7. *Maguire MJ, Schneider JM, Melamed TC, Ralph YK, Poudel S, Raval VM, Mikhail D, Abel AD* (2022) Temporal and topographical changes in theta power between middle childhood and adolescence during sentence comprehension. *Dev Cogn Neurosci* 53: 101056. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.101056>
8. *Nunez PL, Srinivasan R* (2006) *Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG*. Oxford Univ Press. New York.
9. *Schneider J, Maguire M* (2018) Developmental differences in the neural correlates supporting semantics and syntax during sentence processing. *Dev Sci* 22(4): e12782. <https://doi.org/10.1111/desc.12782>
10. *Bastiaansen M, Hagoort P* (2015) Frequency-based segregation of syntactic and semantic unification during online sentence level language comprehension. *J Cogn Neurosci* 27(11): 2095–2107. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00829
11. *Bastiaansen M, Van der Linden M, ter Keurs M, Dijkstra T, Hagoort P* (2005) Theta responses are involved in lexico-semantic retrieval during language processing. *J Cogn Neurosci* 17: 530–541. <https://doi.org/10.1162/0898929053279469>
12. *Lam NHI, Schoffelen JM, Uddén J, Hultén A, Hagoort P* (2016) Neural activity during sentence processing as reflected in theta, alpha, beta, and gamma oscillations. *NeuroImage* 142: 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.007>
13. *Klimesch W, Doppelmayr M, Wimmer H, Schwaiger J, Röhm D, Gruber W, Hutzler F* (2001) Theta band power changes in normal and dyslexic children. *Clin Neurophysiol* 112(7): 1174–1185. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(01\)00545-4](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(01)00545-4)
14. *Spironelli C, Angrilli A* (2010) Developmental aspects of language lateralization in delta, theta, alpha and beta EEG bands. *Biol Psychol* 85(2): 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.07.011>
15. *Wang L, Bastiaansen M* (2014) Oscillatory brain dynamics associated with the automatic processing of emotion in words. *Brain and Language* 137: 120. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2014.07.011>
16. *Saltuklaroglu T, Bowers A, Harkrider AW, Casenhiser D, Reilly KJ, Jenson DE, Thornton D* (2018) EEG mu rhythms: rich sources of sensorimotor information in speech processing. *Brain and Language* 187: 141. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2018.09.005>
17. *Thornton D, Harkrider AW, Jenson D, Saltuklaroglu T* (2018) Sensorimotor activity measured via oscillations of EEG mu rhythms in speech and non-speech discrimination tasks with and without segmentation demands. *Brain Lang* 187: 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.03.011>
18. *Belalov VV, Bazanova OM, Mikhailova AA, Dyagileva YuO, Pavlenko VB* (2020) EEG mu rhythm reactivity during speech perception in children aged from two to three years: influence of rearing conditions. *IP Pavlov J Higher Nervous Activity* 70(2): 193–205. <https://doi.org/10.31857/S0044467720020045>
19. *Lewis AG, Wang L, Bastiaansen M* (2015) Fast oscillatory dynamics during language comprehension: Unification versus maintenance and prediction? *Brain Lang* 148: 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.01.003>
20. *Lewis AG, Schoffelen JM, Schriefers H, Bastiaansen M* (2016) A predictive coding perspective on beta oscillations during sentence-level language comprehension. *Front Hum Neurosci* 10: 85. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00085>
21. *Schneider JM, Abel AD, Momsen J, Melamed TC, Maguire MJ* (2021) Neural oscillations reveal differences in the process of word learning among school-aged children from lower socioeco-

- onomic status backgrounds. *Neurobiol Lang (Camb)* 2(3): 372.
https://doi.org/10.1162/nol_a_00040
22. Степаненко ДГ, Сагутдинова ЭШ (2010) О классификациях нарушения речи в детском возрасте. *Клин мед* 2: 32–43. [Stepanenko DG, Sagutdinova ESh (2010) About speech/ language disorders classifications in childhood. *Klin Med* 2: 32–43. (In Russ)].
 23. Jiang Z, Waters AC, Liu Y, Li W, Yang Y (2017) Event-related theta oscillatory substrates for facilitation and interference effects of negative emotion on children's cognition. *Int J Psychophysiol* 116: 26.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.02.012>
 24. Craig AR, Fisher WW (2019) Randomization tests as alternative analysis methods for behavior-analytic data. *J Exp Anal Behav* 111(2): 309–328.
<https://doi.org/10.1002/jeab.500>
 25. Maris E, Oostenveld R (2007) Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *J Neurosci Methods* 164(1): 177–190.
<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.03.024>
 26. Brauer J, Friederici AD (2007) Functional neural networks of semantic and syntactic processes in the developing brain. *J Cogn Neurosci* 19(10): 1609–1623.
<https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.10.1609>
 27. Friederici AD, Brauer J, Lohmann G (2011) Maturation of the language network: from inter-to intrahemispheric connectivities. *PLoS One* 6(6): e20726.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020726>
 28. Holland SK, Vannest J, Mecoli M, Jacola LM, Tillema JM, Karunanayaka P, Schmithorst VJ, Yuan W, Plante E, Byars AW (2007) Functional MRI of language lateralization during development in children. *Int J Audiol* 46(9): 533–551.
<https://doi.org/10.1080/14992020701448994>
 29. Walenski M, Europa E, Caplan D, Thompson CK (2019) Neural networks for sentence comprehension and production: An ALE-based meta-analysis of neuroimaging studies. *Human Brain Mapping* 40(8): 2275.
<https://doi.org/10.1002/hbm.24523>
 30. Stroganova TA, Komarov KS, Goiaeva DE, Obukhova TS, Ovsianikova TM, Prokofyev AO, Orekhova EV (2021) The effect of periodicity and “vowelness” of a sound on cortical auditory responses in children. *IP Pavlov J Higher Nervous Activity* 71(4): 563–577.
<https://doi.org/10.1007/s11055-022-01253-z>
 31. Stankova EP, Guillemard DM, Galperina EI (2020) Morpho-functional basis of complex sentence processing in adults and children. *Human Physiol* 46(3): 332–342.
<https://doi.org/10.1134/S0362119720030135>
 32. Klimesch W (1999) EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Brain Res Rev* 29(2-3): 169–195.
[https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(98)00056-3)
 33. Cellier D, Riddle J, Petersen I, Hwang K (2021) The development of theta and alpha neural oscillations from ages 3 to 24 years. *Dev Cogn Neurosci* 50: 100969.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.100969>
 34. Meng X, Sun C, Du B, Liu L, Zhang Y, Dong Q, Georgiou GK, Nan Y (2022) The development of brain rhythms at rest and its impact on vocabulary acquisition. *Dev Sci* 25(2): e13157.
<https://doi.org/10.1111/desc.13157>
 35. Oliveira DS, Saltuklaroglu T, Thornton D, Jenson D, Harkrider AW, Rafferty MB, Casenhiser DM (2021). Mu rhythm dynamics suggest automatic activation of motor and premotor brain regions during speech processing. *J Neurolinguist* 60: 101006.
<https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2021.101006>
 36. Sauseng P, Klimesch W, Doppelmayr M, Pecherstorfer T, Freunberger R, Hanslmayr S (2005) EEG alpha synchronization and functional coupling during top-down processing in a working memory task. *Hum Brain Mapp* 26(2): 148–155.
<https://doi.org/10.1002/hbm.20150>
 37. Smalle EH, Rogers J, Mottonen R (2015) Dissociating Contributions of the Motor Cortex to Speech Perception and Response Bias by Using Transcranial Magnetic Stimulation. *Cereb Cortex* 25(10): 3690–3698.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhu218>
 38. Liebenthal E, Möttönen R (2018) An interactive model of auditory-motor speech perception. *Brain Lang* 187: 33–40.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.12.004>
 39. Knyazev GG (2022) Coding the meaning in brain activity. *IP Pavlov J Higher Nervous Activity* 72(6): 800–825.
<https://doi.org/10.31857/S004446772206003X>

40. *Arévalo AL, Baldo JV, Dronkers NF* (2012) What do brain lesions tell the human mirror neuron system and us about theories of embodied semantics? *Cortex* 48(2): 242–254.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.06.001>
41. *Spitzer B, Haegens S* (2017) Beyond the Status Quo: A Role for Beta Oscillations in Endogenous Content (Re)Activation. *eNeuro* 4(4): ENEURO.0170–17.2017.
<https://doi.org/10.1523/ENEURO.0170-17.2017>

Words Listening Related Electroencephalography Reactivity in Children of Preschool and Primary School Age

M. A. Nacharova^{a, *}, D. V. Nacharov^b, and V. B. Pavlenko^a

^a*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

^b*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

**e-mail: alikina93@gmail.com*

An analysis was made of event-related changes in the electroencephalogram (EEG) spectrum during the auditory perception of nouns in 83 typically developing children aged 4 to 10 years, including 50 children of preschool age and 33 children of primary school age. Following intergroup differences were revealed: in preschool children, neuronal systems are more involved in word processing, the activity of which is reflected in extensive desynchronization of alpha and synchronization of theta activity in the frontal zones of the left hemisphere. The EEG reactivity of primary school children is characterized by bilateral and more pronounced theta synchronization, which indicates an increased intensity of lexico-semantic operations, as well as a decrease in the background and an increase in the evoked theta activity. In children of this group, EEG synchronization in the beta range was also observed, represented by separate flashes and most pronounced in the frontal leads, which is typical for more mature speech processing mechanisms. The study results are important for clarifying the mechanisms of speech understanding in typically developing preschool and primary school age children.

Keywords: speech perception, preschool and primary school age children, EEG, theta activity, alpha activity, beta activity