

**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.821

**ИЗМЕНЕНИЯ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ ПОСЛЕ КУРСА ЗАНЯТИЙ
ПО МЕТОДИКЕ КОМПЛЕКСНОГО МУЗЫКАЛЬНО-ПЕВЧЕСКОГО
ВОСПИТАНИЯ ПО Д.Е. ОГОРОДНОВУ:
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ, СВЯЗАННЫХ С СОБЫТИЯМИ**

© 2025 г. Д. М. Огороднов*, С. А. Евдокимов, Ю. Д. Кропотов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН», Санкт-Петербург, Россия*

**e-mail: dima.ogorodnov@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.08.2024 г.

После доработки 03.12.2024 г.

Принята к публикации 11.12.2024 г.

Исследовались пластические изменения слухового восприятия в ходе занятий по методике комплексного музыкально-певческого воспитания (КМПВ) Д.Е. Огороднова. Группа из 65 детей, помимо школьной музыкальной программы, дополнительно занималась по методике КМПВ пять раз в неделю, а контрольная группа из 29 человек проходила уроки музыки по обычной школьной программе. Испытуемые 7–10 лет выполняли дважды с интервалом в 4 недели тест на слуховое внимание в ODDBALL-парадигме. Для анализа полученных потенциалов, связанных с событием (ПСС), был использован метод слепого разделения источников, основанный на приблизительной совместной диагонализации матриц ковариации, рассчитанных для групповых ПСС. Разложение групповых ПСС на скрытые компоненты позволило выделить компонент, который выявляет специфический эффект тренировки. Как показали наши исследования, у детей из контрольной группы обнаруживается адаптация к слуховой стимуляции, проводимой дважды в течение месяца. Эта адаптация проявлялась в значительном снижении амплитуды височной компоненты ПСС при повторном обследовании. В группе детей, которые занимались по методике КМПВ, такой адаптации обнаружено не было.

Ключевые слова: потенциалы, связанные с событиями, слуховое внимание, нейропластичность, музыкальное воспитание, метод слепого разделения источников

DOI: 10.31857/S0044467725010089

ВВЕДЕНИЕ

Методика комплексного музыкально-певческого воспитания (далее — методика КМПВ, или просто Методика) была разработана Дмитрием Ерофеевичем Огородновым с начала 60-х по середину 70-х годов прошлого века (Огороднов, 1981). Она основана на комплексном сочетании различных модальностей с целью эффективной тренировки вокально-речевых навыков человека. Эти модальности включают слуховую, речедвигательную, моторную, сенсомоторную, зрительную и эмоциональную составляющие. Эффективность Методики доказана в результате многолетней практики как самого автора, так и его учеников и последователей во многих городах страны, с различными хоровыми и вокальными коллективами, детскими и взрослыми (Огороднов, 1981).

Под нейропластичностью в данном контексте понимается свойство мозга человека изменяться под воздействием обучения. Это свойство отражается в изменении объективных показателей деятельности мозга (функциональной МРТ, ПСС) под влиянием опыта. Исследования последних лет с применением методов нейроимиджинга (функциональной МРТ, ЭЭГ) выявили корреляты нейропластичности, вызванные музыкальными и вокальными тренировками (недавний обзор (Olszewska et al., 2021; Penhune, 2019; Zaatari et al., 2023)). Как показано в обзоре (Münste et al., 2002), мозг музыкантов является идеальной моделью нейропластичности.

Во многих исследованиях в качестве объективных показателей этапов переработки слуховой информации используются компоненты потенциалов, связанных с событиями (ПСС), регистрируемые

в слуховой ODDBALL-парадигме, такие как P1, N1, mismatch negativity (MMN), см. обзор (Csépe, Honbolygó, 2024). Например, было показано, что группа, активно вовлеченная в игру на музыкальном инструменте, демонстрировала негативность рассогласования большей амплитуды, чем группа, которая просто слушала музыку (Pantev et al., 2009).

Целью настоящей работы является исследование пластических изменений мозга под влиянием методики КМПВ. В качестве показателя реактивной функции мозга на слуховые стимулы авторы использовали потенциалы, связанные с событиями (ПСС), регистрируемые в 19-канальной ЭЭГ в процессе слухового теста ODDBALL. Здоровые испытуемые в возрасте 7–10 лет были разбиты на две группы, одна из которых в течение четырех недель занималась по методике КМПВ (группа «Методика»), вторая группа (группа «Контроль») занималась музыкой по школьной программе (музыкальная грамота без работы с голосом).

МЕТОДИКА

Испытуемые. В группу «Методика» вошли 65 здоровых детей (54 мальчика), средний возраст которых составлял 8.5 года, SD – 1.5 года. В группу «Контроль» вошли 29 здоровых детей (20 мальчиков), средний возраст – 9.1, SD – 1.1 года. Группы «Методика» и «Контроль» согласно U-критерию Манна–Уитни не различались по возрасту ($p = 0.9$). Все испытуемые на момент исследований учились в общеобразовательной школе, никаких критериев исключения не использовалось. Среди участников не было детей со сниженным слухом и неврологическими заболеваниями в анамнезе. Все испытуемые были знакомы с целью исследований. Они и их родители давали официальное согласие на участие в исследовании и на использование анонимных данных в публикации результатов. Исследование было одобрено этической комиссией ИМЧ РАН.

19-канальная ЭЭГ регистрировалась дважды – в самом начале исследований и спустя 4 недели. Обе группы занимались музыкой по обычной школьной программе. Группа «Методика» в течение этих четырех недель проходила дополнительный курс занятий музыкой (пением) по методике КМПВ (5 раз в неделю, всего около 20 занятий). Контрольная группа между двумя регистрациями ЭЭГ проходила уроки музыки по обычной школьной программе.

Методика КМПВ по Огороднову. Суть данной методики подробно описана в книге Д.Е. Огороднова (Огороднов, 1981). Если коротко, она предлагает систему вокально-речевых упражнений, эффективность которых многократно усиливается благодаря применению на занятиях наглядных обучающих схем-алгоритмов и специфических движений (жестуляции) рук. Учащиеся выполняют

эти упражнения, ведя рукой по точкам и линиям по схемам, на которых наглядно изображены интонационные, артикуляционные, дыхательные и другие процессы. Каждое упражнение выполняется в четко организованном времени, музыкальной форме, способствуя воспитанию должных навыков интонирования, следования метроритмическим и ладовым принципам, а также тембрального владения вокальным материалом. В ходе выполнения упражнений специально обученный педагог направляет работу учащихся, следит за чистотой и непринужденностью их голосов, точностью движений рук по схемам, правильностью и естественностью артикулирования.

Комбинированное задействование голоса, артикуляции, рук, зрения применяется для большей осознанности в пении, чего удастся достичь благодаря активному включению дополнительных (к аудиальной), неспецифических для «любительского» пения модальностей: визуальной, соматосенсорной, эмоциональной. Тогда пение по эффективности становится сравнимым с вербальной передачей информации об эмоциональном состоянии исполнителя или смысловом (образном) наполнении исполняемого музыкального произведения (Proverbio, Russo, 2022). В любительском пении нет работы над функциональной нагрузкой голосовых мышц, непринужденность при таком пении часто не является целью (Огороднов, 1981).

Данное исследование проводилось лонгитюдно для одних и тех же испытуемых. Это обстоятельство является важным, так как показано, что при поперечном исследовании связь между наблюдаемыми различиями не может быть выведена в корреляционных исследованиях (Schellenberg, 2020).

Тест на слуховое внимание. Тест проводился в oddball-парадигме. Испытуемым предлагалась последовательность коротких (длительностью 100 мс, «стандартных») и длинных (400 мс, «девиантных») тоновых посылок. Воспроизведение звуковой последовательности осуществлялось через компьютерные аудиоколонки с помощью программы PsyTask v1.57. Звуки предъявлялись в случайном порядке, с вероятностью девиантных стимулов 20%. Громкость звуковых стимулов – около 70 дБ. Частоты тоновых посылок – 1000, 1200, 1400 и 1600 Гц – чередовались в случайном порядке. Интервал между началами стимулов составлял 1100 мс. Суммарное количество стимулов было 994, из которых 194 составляли девиантные стимулы.

Испытуемые получали инструкцию как можно быстрее нажимать на кнопку мыши указательным пальцем правой руки в ответ на длинные, целевые звуки-стимулы (то есть девиантные), игнорируя короткие. Регистрировалось количество ошибок (пропуск длинного звука и ложных нажатий на короткий звук) и время реакции испытуемых,

рассчитывалась стандартная ошибка времени реакции.

Регистрация ЭЭГ и вычисление ПСС. ЭЭГ была записана с помощью компьютерного электроэнцефалографа «Мицар-ЭЭГ-201». Для постановки электродов использовалась международная система 10-20, 19 электродов в точках Fp1; Fp2; F7; F3; Fz; F4; F8; T3; C3; Cz; C4; T4; T5; P3; Pz; P4; T6; O1; O2. Референтные электроды крепились на мочках ушей. Заземляющий электрод был закреплен в точке Fpz. Сопротивление электродов не превышало 5 кОм. Частота квантования сигналов составляла 250 Гц. Параметры фильтров высоких и низких частот составляли 0.53 Гц ($\tau = 0.3$ с) и 50 Гц соответственно. Сетевая электромагнитная помеха подавлялась с помощью цифрового режекторного фильтра с полосой непропускания 45–55 Гц. Для регистрации моторной реакции испытуемого использовалась компьютерная мышь, подключаемая к электроэнцефалографу.

Полученные в ходе исследования цифровые записи ЭЭГ обрабатывались при помощи программы WinEEG v. 3.4. Коррекция артефактов моргания выполнялась с помощью метода, предложенного Vigário (Vigário, 1997), использующего разложение ЭЭГ на независимые компоненты. На следующем этапе пробы, содержащие другие виды артефактов, автоматически исключались из дальнейшего анализа на основе следующего, эмпирически подобранного критерия: фрагменты ЭЭГ считались артефактами и исключались из дальнейшего анализа, если они превышали порог 100 мкВ в любом отведении; в медленном частотном диапазоне (0.53–1 Гц) превышали порог 50 мкВ; в высокочастотном диапазоне (20–35 Гц) превосходили порог в 30 мкВ.

Исходная ЭЭГ регистрировалась относительно среднего потенциала референтных ушных электродов (Ref). Далее записи ЭЭГ преобразовывались по отношению к усредненному по всем электродам потенциалу (A_v).

ПСС были вычислены отдельно для каждого условия и каждого испытуемого методом усреднения во временном интервале от –100 до 900 мс. Для вычисления индивидуальных, усредненных по отведениям ПСС использовали записи ЭЭГ, содержавшие не менее 30 безартефактных проб, соответствующих правильным ответам. ПСС вычислялись путем усреднения ЭЭГ в пробах, принадлежащих двум разным категориям раздельно: «короткий» звук, являющийся стандартным нерелевантным стимулом ODDBALL-парадигмы, «длинный» звук – девиантный релевантный стимул. Вычисление усреднений для индивидуальных и групповых ПСС происходило независимо для каждого отведения и каждой группы.

В исследовании использовался метод слепого выделения источников, основанный на взаимной

диагонализации матриц ковариации групповых ПСС (Ponomarev, Kropotov, 2023).

Кластерный анализ производился на основе индивидуальных ПСС (от начала стимула до 900 мс) участников группы (Maris, Oostenveld, 2007 и Pernot et al., 2015). Результаты этого анализа приводятся на рисунках на основе усредненных ПСС. В качестве зависимых параметров использовались значения ПСС (Short и Long), а в качестве независимых – параметры «до»/«после». Преимуществом основанного на кластерах анализа по сравнению с традиционно используемыми методами является то, что при этом автоматически (без участия человека) выполняется поиск однонаправленных статистически значимых ($p < 0.05$) различий сигналов ПСС между условиями, которые группируются в кластеры на основании временной и пространственной близости. В результате этого поиска обычно выделяется небольшое число кластеров, для каждого из которых выполняются статистические оценки, что позволяет снизить размерности исходных данных и эффективно решить проблему множественных проверок статистических гипотез. Статистическая значимость различий сигналов в кластере выполняется путем многократного (в нашем случае – 10 000 раз) случайного перемешивания данных (в нашем случае – условий) и оценки вероятности наблюдения кластеров с похожими статистическими характеристиками в этих искусственно синтезированных данных. Описанный статистический анализ производился в программе WinEEG v. 3.4.

Статистический анализ поведенческих характеристик производился однофакторным анализом ANOVA в программе Statistica v10.0. Анализ делался отдельно для групп, пропусков и ложных нажатий. В качестве факторов использовались параметры «до» (первая запись теста) и «после» (вторая запись).

Для определения локализаций и получения трехмерных изображений предполагаемых источников генерации ПСС был использован метод томографии низкого разрешения sLORETA (Pascual-Marqui, 2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поведенческие показатели в тесте ODDBALL на слуховое внимание. Количественные показатели выполнения теста по группам («Методика», «Контроль») и по времени выполнения теста («до», «после») представлены в табл. 1.

Как показывают результаты статистического анализа ANOVA, группы «Методика» и «Контроль» практически не отличаются друг от друга по поведенческим показателям в начале исследования (для пропусков: $F[1, 92] = 0.4, p < 0.5$, для ложных нажатий: $F[1, 92] = 0.1, p < 0.7$). Для группы «Контроль»

Таблица 1. Поведенческие показатели выполнения ODDBALL-теста, усредненные по группам
Table 1. Behavioural performance indicators of the ODDBALL test, averaged across groups

Стимул	Группа	Количество участников	Пропуски в %	Ложные нажатия в %	Время реакции (ВР)	Стандартная ошибка ВР
Кор	«Методика»	65		3.14%		
Дл		65	24.6%		546	11.9
Кор	«Методика»	65		1.89%		
Дл		65	17.7%		553	9.5
Кор	«Контроль»	29		2.91%		
Дл		29	21.8%		554	9.8
Кор	«Контроль»	29		2.03%		
Дл		29	20.6%		555	9.9

при повторном исследовании эти показатели статистически не изменились.

Совершенно другая картина наблюдалась в группе «Методика». Процент пропусков (показатель устойчивости внимания) в этой группе уменьшился на 39% от первоначального значения (с 24.6% до 17.7%) ($F[1, 128] = 4.8, p < 0.03$), а процент ложных нажатий (показатель импульсивности) – на 66% (с 3.14% до 1.89%) ($F[1, 128] = 10.8, p < 0.001$).

Результаты расчета ПСС. На рис. 1 представлены ПСС, усредненные по всем испытуемым и обеим записям (до, после) отдельно для коротких (серый цвет) и длинных (черный цвет) стимулов. Отмечены две стандартные составляющие ПСС – волна N2 (с латентностью 270 мс), имеющая лобную локализацию, и волна P3 (с латентностью 450 мс), имеющая теменно-височную локализацию. Данный расчет производился для традиционного выделения компонент ПСС в используемом слуховом тесте.

Разложение на скрытые компоненты. Как известно, ПСС даже в ответ на простые стимулы представляют собой сумму нескольких скрытых компонент (Luck S.J. 2012). Нами был предложен метод, позволяющий разложить групповые потенциалы на скрытые компоненты (Ponomarev, Kropotov, 2023). Данный метод позволяет более точно определить топографию компоненты ПСС. Результаты разложения всех ПСС (ПСС для обоих условий, для длинного и короткого сигналов, ПСС 1-й и 2-й записи обеих групп представлены на рис. 2).

Скрытые компоненты имеют различную топографию, согласно данным sLORETA (Pascual-Marqui, 2002), локализованы в различных областях коры. Полученные скрытые компоненты ПСС (рис. 2) были соотнесены со стандартными ПСС (рис. 1) по топографии и латентности ПСС. Первый компонент, с максимумом в 270 мс, аналогичный компоненту N2, локализован в верхней височной

извилине (рис. 2 (а)). Его ранние реакции (ранними реакциями в данном тесте считались компоненты латентностью до 300 мс) чувствительны к длительности стимула. Второй и третий компоненты, с латентностью 450 мс, являются результатом разложения P3. Второй компонент локализован в постцентральной извилине (рис. 2 (б)), его ранние реакции нечувствительны к длительности стимула. Третий компонент локализован в задней поясной извилине (рис. 2 (в)), проявляется в поздней своей реакции исключительно в ответ на моторную реакцию испытуемого. В отличие от первых двух компонентов, латентность третьего компонента зависит от времени реакции: чем быстрее ответ, тем меньше латентность поздней реакции компонента. На растре рис. 2 (в) видно, что чем раньше происходит ответ испытуемого, тем меньше латентность ПСС.

Эффект занятий по методике КМПВ на динамику височной компоненты. Кластерный анализ, проводившийся отдельно для каждого стимула (Short, Long) и отдельно для двух групп испытуемых, при сравнении индивидуальных ПСС «до» и «после» показал, что из всех трех скрытых компонент лишь одна, височная компонента (рис. 2 (а)) показала статистически значимые различия, и только в группе «Контроль». На рис. 3 представлена разностная кривая, вычисленная для группы контроля. Никаких значимых кластеров не было обнаружено для группы «Методика».

Как видно из рис. 3 (в) и 3 (д), средняя амплитуда ранней реакции компоненты остается постоянной в течение всего исследования в группе «Методика»: для короткого звукового стимула средние значения ПСС «до» и «после» не различаются (95%-ные доверительные интервалы средних значений перекрываются для (в1) и (в3), так же и для длинного звукового стимула (д5) и (д7). В группе «Контроль» такое сравнение ПСС показывает значимое уменьшение ПСС ко второй

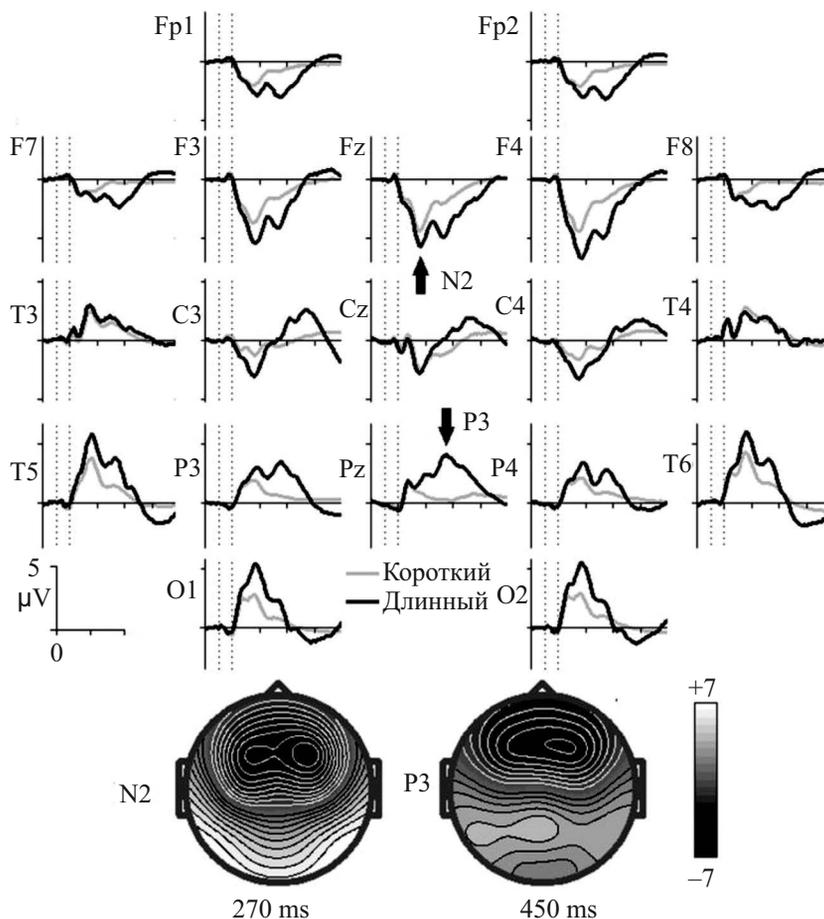


Рис. 1. ПСС, усредненные по всем испытуемым. Линии серого цвета – ПСС на короткие звуковые стимулы, черного – ПСС на длинные звуковые стимулы. Под графиком приведены топографии N2- и P3-компонент.
Fig. 1. ERP averaged over all subjects. Gray lines are ERP for short sound stimuli, black lines are PSS for long sound stimuli. The topographies of the N2 and P3 components are shown below the graph.

записи для короткого (в2, в4) и длинного (дб, д8) звуковых стимулов. Уместно здесь отметить, что в исходном обследовании («до») обе группы статистически не различались в отношении как этой компоненты, так и двух оставшихся: (в1, в2) для ПСС на короткий звуковой стимул, (д5, д6) для ПСС на длинный звуковой стимул.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предыдущие исследования показали, что занятия музыкой (вокалом) приводят к пластическим изменениям в мозге человека, выражающимся в увеличении связанности между слуховой корой и зонами мозга, которые участвуют в обработке звуковой информации (Olszewska et al., 2021). В небольшом числе исследований музыкально-вокальные тренировки были ограничены несколькими неделями (Огороднов, 2021).

В результатах данного исследования ожидалось, что для ПСС группы «Методика» при повторном исследовании будет наблюдаться увеличение амплитуды компонентов ПСС по отношению к первому исследованию. Такой результат можно было бы связать с тем, что в соответствующих отделах головного мозга улучшился ответ на звуковой стимул. Но вышеописанные результаты продемонстрировали другой эффект, а именно: значимое снижение ПСС в группе «Контроль» и отсутствие этого снижения ПСС в группе «Методика». Этот результат был нами определен как отсутствие адаптации внимания (сопротивление угасанию внимания) в группе «Методика», то есть неснижение внимания к обработке звукового сигнала. Пластические изменения в мозге приводили не к увеличению ПСС, а к удержанию его амплитуды на неизменном уровне.

Настоящее исследование является первым, которое демонстрирует, что пластические изменения,

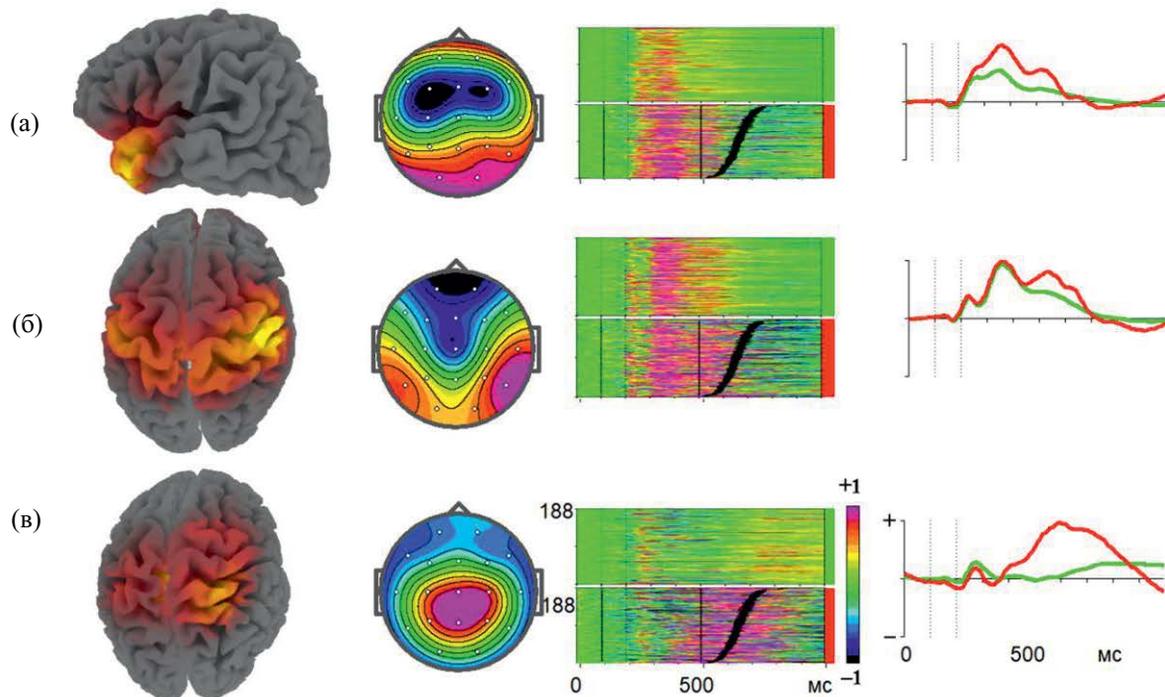


Рис 2. Скрытые компоненты ПСС: (а) – первая, (б) – вторая, (в) – третья, индивидуальные и усредненные по всем испытуемым. ПСС на длинный стимул – красная линия, на короткий – зеленая. Слева направо: локализация ПСС по sLORETA, топография компонент, прямоугольные растры индивидуальных компонент (каждая горизонтальная линия на растре представляет индивидуальный ПСС, цвет которого кодирует амплитуду этого ПСС) и графики ПСС для коротких (зеленые линии) и длинных стимулов (красные линии). Для получения разложения использовались следующие записи ПСС: 1-я и 2-я записи для групп «методика» и «контроль». Индивидуальные ПСС в растрах выстроены по мере увеличения времени реакции (сверху вниз), время реакции на девиантный стимул отображено черным цветом. По правой стороне растра цветом указано условие ПСС: длинный сигнал – красная вертикальная полоса, короткий – зеленая вертикальная полоса.

Fig. 2. Latent components of the ERP: (a) – the first, (б) – the second, (в) – the third, individual and averaged over all subjects. The ERP to a long stimulus is the red line, to a short stimulus – the green. From left to right: ERP localization according to sLORETA, component topography, rectangular rasters of individual components (each horizontal line on the raster represents an individual ERP, the color of which codes the amplitude of this ERP) and ERP graphs for short (green lines) and long stimuli (red lines). The following ERP records were used to obtain the decomposition: the 1st and 2nd records for the “method” and “control” groups. Individual ERPs in the rasters are arranged in order of increasing reaction time (from top to bottom), the reaction time to the deviant stimulus is shown in black. On the right side of the raster, the ERP condition is indicated by color: a long signal is a red vertical stripe, a short one is a green vertical stripe.

имеющие результатом улучшение внимания к звуку (снижение количества ошибок в тестировании), могут быть вызваны и относительно коротким периодом занятий по Методике КМПВ. Предполагается, что увеличение связности (синхронной работы между отделами мозга) отражается на стабильности ответов височной компоненты ПСС (повторяемости), которые противодействуют адаптации и, в итоге, неснижению амплитуды ПСС при повторных исследованиях. Такое увеличение связности между отделами мозга показано в фМРТ-исследовании (Медведев и др., 2018). Исходя из полученных нами результатов, сохраняющийся уровень амплитуды ПСС в целевой группе может обуславливаться увеличением связности без увеличения активации

ПСС. Многочисленные исследования влияния музыкальных занятий на увеличение связности представлены в таблице 2 в обзоре (Olszewska et al., 2021). Эти же изменения могут вызывать улучшения в поведенческих характеристиках (значимое снижение количества ошибок при тестировании).

Вычисленные слуховые ПСС детей существенно отличаются от классических P1/N1-компонент, регистрируемых у взрослых испытуемых (ср. рис. 1 настоящей статьи и рис. 1 в (Albrecht et al., 2000)). В условиях нашего исследования в ПСС в ответ на стандартный звуковой стимул отчетливо выделялась негативная волна (N2) с пиковой латентностью около 280 мс и лобным распределением. В ситуации предъявления

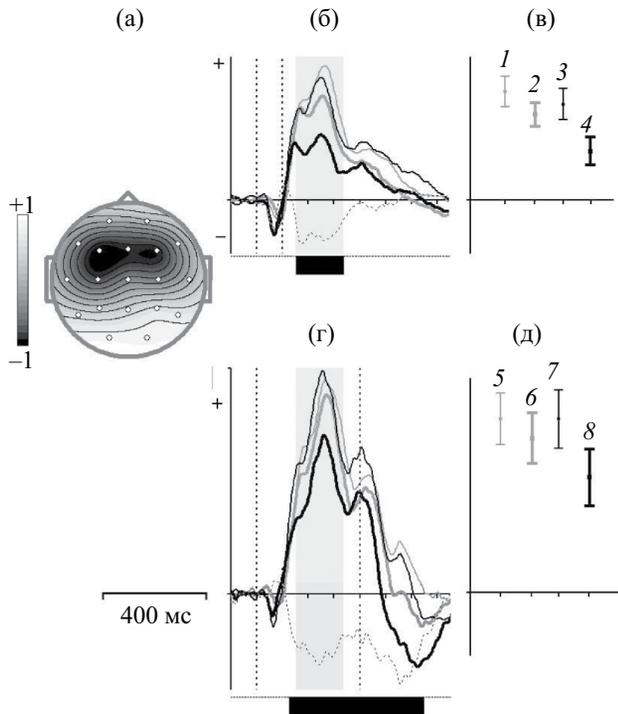


Рис. 3. Динамика первой (височной) скрытой компоненты в ответ на короткие стимулы (б, в) и длинные стимулы (г, д) в зависимости от группы («Методика», «Контроль») и условия («до», «после»). Представлена топография компоненты (а). Условные обозначения: тонкие линии – «Методика», толстые линии – «Контроль». Условие «до» – линия серого цвета, «после» – черного. Пунктир – разностная кривая для компонент «после» минус «до» для группы «Контроль». Под графиками – статистически значимый кластер ($p < 0.05$) для этой разностной кривой (черная заливка). Серой заливкой (б, г) отображается временной отрезок полуволны, выбранный для статистического анализа (в, д). Для этих средних значений выбранных интервалов на графиках (в, д) представлены величины 95%-ных доверительных интервалов для средних амплитуд компонент.

Fig. 3. Dynamics of the first (temporal) hidden component in response to short stimuli (b, v) and long stimuli (g, d) depending on the group ("Method", "Control") and the condition ("before", "after"). The topography of the component is shown (a). Legend: thin lines – "Method", thick lines – "Control". The "before" condition is a gray line, the "after" condition is a black line. The dotted line is the difference curve for the "after" minus "before" components for the "Control" group. The statistically significant cluster ($p < 0.05$) for this difference curve (black fill) is below the graphs. The gray fill (б, г) shows the time interval of the half-wave selected for the statistical analysis (в, д). For these average values of the selected intervals, the graphs (в, д) show the values of the 95% confidence intervals for the average amplitudes of the components.

девиантного стимула моторная реакция испытуемых (со средним временем реакции 550 мс) сопровождалась появлением дополнительной

теменно-височной положительной волны с максимумом в Pz на 450 мс. Полученные результаты о более поздних латентностях слуховых компонент у детей по отношению ко взрослым испытуемым совпадают с таковыми, полученными в предыдущих исследованиях (Albrecht et al., 2000, Ruhnau et al., 2011; Tomé et al., 2015).

Впервые в нашем исследовании мы использовали метод слепого выделения источников, основанный на взаимной диагонализации матриц ковариации групповых ПСС (Ponomarev, Kropotov, 2023). В отличие от ранее используемого Метода независимых компонент (ICA) (Makeig et al., 1997; Wisniewski et al., 2024), этот метод не предполагает стационарности исследуемого процесса и может быть использован для групповых ПСС, которые по своей сути являются откликами системы на внешнее воздействие (Ponomarev, Kropotov, 2023).

Разложение групповых ПСС на скрытые компоненты позволило выделить компоненту, которая выявляет специфический эффект тренировки (рис. 3).

Как показали результаты статистического анализа компонент в двух группах до и после четырехнедельных интервенций, единственной компонентой, чувствительной к влиянию занятий по методике КМПВ, является компонента с височным распределением источников тока. Основываясь на данных sLORETA (Pascual-Marqui, 2002), примененной к соответствующей топографии, можно предположить, что пластические изменения, наблюдаемые в нашем исследовании, происходят в первичных и/или вторичных областях слуховой коры. По данным МРТ-исследования (Matuszewski, 2021), такая пластичность может быть связана с изменением объема серого вещества и внутрикоркового миелина.

Как показало наше исследование, мозг детей от 7 до 10 лет из группы «Контроль» обнаруживает отчетливую адаптацию к повторной слуховой стимуляции. В данной работе понятие «адаптация» используется для обозначения процесса привыкания к стимулу, при котором происходит снижение ПСС во время повторного тестирования. У группы «Контроль» эта адаптация проявлялась в отчетливом уменьшении амплитуды височной компоненты (рис. 2 (а)). Это уменьшение амплитуды представлено и на рис. 3: (в2), (в4) и (д6), (д8). В исследовании (Räikkönen et al., 2003) подобная адаптация обнаруживается у 6-летних детей. На рис. 1 в исследовании (Räikkönen et al., 2003) видно, что лобно-центральная негативная составляющая ПСС у шестилетних детей уменьшается во время повторной регистрации, что подтверждает результаты группы «Контроль» из нашего исследования. В исследовании на слуховую стимуляцию (Ip et al., 2018), наоборот, демонстрируется, что у взрослых испытуемых присутствует надежность воспроизводимости ПСС в повторной записи, как и у группы «Методика» в нашем исследовании.

В нашей работе подтвердился факт снижения ПСС (адаптации) в группе «Контроль». Новым результатом, полученным в настоящей работе, является открытие того факта, что занятия по методике КМПВ в течение месяца препятствуют адаптации ПСС у одних и тех же испытуемых. Это свидетельствует о том, что занятия пением по методике КМПВ, благодаря использованию в ней мультимодальности, могут влиять на увеличение связности работы зон мозга и неснижение ПСС при повторном тестировании. Предполагается, что найденный эффект препятствует процессу адаптации (привыканию). Эта нейрофизиологическая устойчивость коррелирует со значимым улучшением поведенческих показателей в тесте на слуховое внимание, обнаруженным исключительно в группе «Методика». Сходное исследование когнитивных функций во время занятий музыкой показало, что такие изменения могут быть связаны с улучшением обучаемости и интеллекта (Bianco et al., 2019; Burgoyne et al., 2019).

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Д.М. Огороднов – проведение занятий с испытуемыми, запись ЭЭГ, написание текста статьи. С.А. Евдокимов – статистическая обработка полученных данных, подготовка иллюстраций, написание текста статьи; Ю.Д. Кропотов – разработка дизайна эксперимента, написание текста статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О ФИНАНСОВОЙ ПОДДЕРЖКЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ по теме № FMMW-2022-0002.

ЭТИЧЕСКИЕ НОРМЫ

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом — ИМЧ РАН (Санкт-Петербург).

ИНФОРМИРОВАННОЕ СОГЛАСИЕ

Каждый участник исследования предоставил 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 настоящей статьи.

ДОСТУПНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Доступны по запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Медведев С.В., Киреев М.В., Коротков А.Д.* Организация нейрональных систем обеспечения целенаправленной деятельности человека: новые данные. Физиология человека. 2018. 44 (4): 131–136. doi: 10.1134/S0131164618040094.
- Огороднов Д.Е.* Музыкально-певческое воспитание детей в общеобразовательной школе. Киев: «Музична Украина», 1981. 167 с.
- Огороднов Д.М., Евдокимов С.А., Гапонова В.Е.* Исследование изменений потенциалов, связанных с событиями, в ходе музыкально-певческого воспитания по методу Д.Е. Огороднова. В сб.: Первый Национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейротехнологиям. Девятая международная конференция по когнитивной науке: Сборник научных трудов. В 2 чч. Ч. 1. Москва, 2021. С. 453–456.
- Albrecht R., Suchodoletz W., Uwer R.* The development of auditory evoked dipole source activity from childhood to adulthood. Clin. Neurophysiol. 2000. Dec. 111(12):2268–76. PMID: 11090781. doi: 10.1016/s1388-2457(00)00464-8
- Bianco R., Gold B.P., Johnson A.P., Penhune V.B.* Music predictability and liking enhance pupil dilation and promote motor learning in non-musicians. 2019. Sci. Rep. 9:17060. doi: 10.1038/s41598-019-53510-w.
- Burgoyne A.P., Harris L.J., Hambrick D.Z.* Predicting piano skill acquisition in beginners: the role of general intelligence, music aptitude, and mindset. Intelligence. 2019. 76:101383. doi: 10.1016/j.intell.2019.101383.
- Cassidy C., Winter P., Cumbia S.* An interprofessional early childhood training program: speech-language pathology and music therapy student outcomes and reflections. J. Interprof. Care. 2019. 34 (6). 819–821. <https://doi.org/10.1080/13561820.2019.1696761>.
- Ip C.T., Ganz M., Ozenne B., Sluth L.B., Gram M., Viardot G., l'Hostis P., Danjou P., Knudsen G.M., Christensen S.R.* Pre-intervention test-retest reliability of EEG and ERP over four recording intervals. Int. J. Psychophysiol. 2018. Dec. 134:30–43. Epub. 2018. Sep. 22. PMID: 30253197. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2018.09.007

- Csépe V., Honbolygó F.* From psychophysiology to brain imaging: forty-five years MMN history of investigating acoustic change sensitivity. *Biol. Futur.* 2024. Mar. 75(1):117–128. Epub. 2024. Apr. 12. PMID: 38607546.
doi: 10.100 PMID: 11090781. 7/s42977-024-00216-4
- Luck S.J., Kappenman E.S.* (Eds.) *The Oxford handbook of event-related potential components.* Oxford: Oxford University Press. 2012. 642 p.
- Makeig S., Jung T.P., Bell A.J., Ghahremani D., Sejnowski T.J.* Blind separation of auditory event-related brain responses into independent components. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1997. Sep. 30; 94(20):10979–84. PMID: 9380745; PMCID: PMC23551.
doi: 10.1073/pnas.94.20.10979.
- Maris E., Oostenveld R.* Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of neuroscience methods.* 2007. 164. 177–90.
10.1016/j.jneumeth.2007.03.024.
- Matuszewski J., Kossowski B., Bola Ł., Banaszekiewicz A., Paplińska M., Gyger L. et al.* Brain plasticity dynamics during tactile Braille learning in sighted subjects: multi-contrast MRI approach. *NeuroImage.* 2021. 227:117613.
doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.117613.
- Münte T.F., Altenmüller E., Jäncke L.* The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nat. Rev. Neurosci.* 2002. Jun. 3(6):473–8. PMID: 12042882.
doi: 10.1038/nrn843
- Olszewska A.M., Gaca M., Herman A.M., Jednoróg K., Marchewka A.* How Musical Training Shapes the Adult Brain: Predispositions and Neuroplasticity. *Front. Neurosci.* 2021. Mar. 10; 15:630829. PMID: 33776638; PMCID: PMC7987793.
doi: 10.3389/fnins.2021.630829
- Pantev C., Lappe C., Herholz S.C., Trainor L.* Auditory-somatosensory integration and cortical plasticity in musical training. *Ann. NY Acad. Sci.* 2009. Jul. 1169:143–50. PMID: 19673770.
doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04588.x
- Pascual-Marqui R.* Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods Find Exp. Clin. Pharmacol.* 2002. 24. Suppl D: 5–12. PMID: 12575463.
- Penhune V.B.* “Musical expertise and brain structure: the causes and consequences of training” in *The Oxford Handbook of Music and the Brain*, eds M. H. Thaut, and D. A. Hodges (Oxford: Oxford University Press). 2019. 417–438.
doi: 10.1093/oxfordhb/9780198804123.013.17.
- Pernet C.R., Latinus M., Nichols T.E., Rousselet G.A.* Cluster-based computational methods for mass univariate analyses of event-related brain potentials/fields: A simulation study. *J. Neurosci Methods.* 2015. Jul. 30. 250:85–93. Epub. 2014. Aug. 13. PMID: 25128255; PMCID: PMC4510917.
doi: 10.1016/j.jneumeth.2014.08.003
- Ponomarev V.A., Kropotov J.D.* Second Order Blind Identification of Event Related Potentials Sources. *Brain Topogr.* 2023. 36. 797–815.
<https://doi.org/10.1007/s10548-023-00998-1>.
- Proverbio A.M., Russo F.* Multimodal recognition of emotions in music and language. *Psychol. Music.* January 2022. Vol. 50. Issue 1. Pp. 54–68.
<http://dx.doi.org/10.1177/0305735620978697>.
- Räikkönen K., Birkás E., Horváth J., Gervai J., Winkler I.* Test-retest reliability of auditory ERP components in healthy 6-year-old children. *Neuroreport.* 2003. Nov. 14;14(16):2121–5. PMID: 14600509.
doi: 10.1097/00001756-200311140-00022
- Ruhnau P., Herrmann B., Maess B., Schröger E.* Maturation of obligatory auditory responses and their neural sources: evidence from EEG and MEG. *Neuroimage.* 2011. Sep. 15; 58 (2):630–9. Epub. 2011. Jun. 25. PMID: 21726651.
doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.06.050
- Schellenberg E.G.* Correlation = causation? Music training, psychology, and neuroscience. *Psychol. Aesthet. Creat. Arts.* 2020. 14, 475–480.
- Tomé D., Barbosa F., Nowak K., Marques-Teixeira J.* The development of the N1 and N2 components in auditory oddball paradigms: a systematic review with narrative analysis and suggested normative values. *J. Neural. Transm. (Vienna).* 2015. Mar. 122(3):375–391. Epub. 2014. Jun. 25. PMID: 24961573.
doi: 10.1007/s00702-014-1258-3
- Vigario R.* Extraction of ocular artifacts from EEG using independent component analysis. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1997. V. 103. № 3. P. 395.
- Wisniewski M.G., Joyner C.N., Zakrzewski A.C., Makeig S.* Finding tau rhythms in EEG: An independent component analysis approach. *Hum. Brain Mapp.* 2024. Feb. 1; 45(2):e26572. PMID: 38339905; PMCID: PMC10823759.
doi: 10.1002/hbm.26572
- Zaatar M.T., Alhakim K., Enayeh M., Tamer R.* The transformative power of music: Insights into neuroplasticity, health, and disease. *Brain Behav. Immun. Health.* 2023. Dec. 12;35:100716. PMID: 38178844; PMCID: PMC10765015.
doi: 10.1016/j.bbih.2023.100716

PLASTIC CHANGES IN AUDITORY PERCEPTION DURING A COURSE OF COMPREHENSIVE MUSIC AND SINGING EDUCATION BY D. E. OGORODNOV: STUDY OF EVENT-RELATED POTENTIALS

D. M. Ogorodnov[#], S. A. Evdokimov, Y. D. Kropotov

N. P. Bekhtereva Institute of the Human Brain of the Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia
[#]*e-mail: dima.ogorodnov@mail.ru*

The plastic changes in auditory perception during classes using the complex music and singing education method by D.E. Ogorodnov were studied. A group of 65 children, in addition to the school music program, additionally studied using the Ogorodnov's method five times a week, and the control group of 29 people took music lessons according to the regular school program. The subjects aged 7–10 years performed the auditory attention test in the ODDBALL paradigm twice with an interval of 4 weeks. To analyze the obtained event-related potentials (ERPs), the blind source separation method was used, based on the approximate joint diagonalization of the covariance matrices calculated for the group ERPs. Decomposition of the group ERPs into hidden components made it possible to isolate the component that reveals the specific effect of training. As our studies have shown, children from the control group show adaptation to auditory stimulation carried out twice during a month. This adaptation was manifested in a significant decrease in the amplitude of the temporal component of the ERP during the repeated examination. In the group of children who studied using the Ogorodnov's method, such adaptation was not found.

Keywords: event-related potentials, auditory attention, neuroplasticity, music education, blind source separation method