

На правах рукописи

Радченко Григорий Сергеевич

Особенности показателей ЭЭГ и вегетативной регуляции при воздействии музыкальных фрагментов с разной тональной модуляцией

Специальность 03.03.01 - физиология

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Нижний Новгород — 2017

Работа выполнена на базе кафедры психофизиологии факультета социальных наук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: **Федотчев Александр Иванович**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, зам. зав. Лаб. механизмов рецепции Института биофизики клетки РАН, рук. группы «Адаптация ЦНС»

Научный консультант: **Парин Сергей Борисович**, доктор биологических наук, профессор кафедры психофизиологии факультета социальных наук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Официальные оппоненты: **Иваницкий Георгий Алексеевич**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории высшей нервной деятельности человека ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии» РАН (ИВНДиНФ РАН), г. Москва

Воловик Михаил Григорьевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отделения функциональной диагностики ФГБУ «Приволжский Федеральный медицинский исследовательский центр» Минздрава России (ПФМИЦ МЗ РФ), г. Нижний Новгород

Ведущая организация: ФГБУН «Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук» (ИТЭБ РАН), г. Пущино Московской области

Защита состоится: «08» июня 2017 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.21 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте: <https://diss.unn.ru/703>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Акинчиц Елена Константиновна

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

Музыка и музыкоподобные сигналы все активнее используются в программах развития и реабилитации когнитивных функций человека (Федотчев, Радченко, 2013). В связи с этим, исследование влияния таких сигналов и их составляющих на человека позволит более точно подбирать музыкальные композиции и является актуальным. Эти исследования можно условно разделить на несколько направлений.

Первое направление связано с изучением особенностей восприятия музыки, связанных с акустикой отдельных звуков и тонов. К нему можно отнести изучение особенностей восприятия музыкальных тонов, начало которому положил Г. Фехнер в своей работе «Элементы психофизики» (Deutsch, 2013). В рамках данного направления предприняты попытки построения моделей «тембрального пространства» (McAdams et al., 1995), а также активно изучаются особенности восприятия тембра и тембровых изменений при различных условиях прослушивания (Kong et al., 2011).

Ко второму направлению можно отнести исследования, изучающие физиологические реакции организма при прослушивании музыки. Установлено, что в этих условиях происходят изменения ряда показателей автономной нервной системы, таких как ритмы сердца и дыхания (Bernardi et al., 2006), уровень электропроводности кожи (Guhn et al., 2007) и гормональный статус (VanderArk, Ely, 1993). Продемонстрировано также положительное влияние классической музыки на восстановление функционального состояния после учебных нагрузок у студентов (Геворкян и др., 2013) и реабилитационное воздействие (по показателям изменений ЧСС и индекса напряжения) на вегетативный статус учащихся (Dousty et al., 2011).

Третье направление изучает влияние прослушивания и исполнения музыки на когнитивные способности. Этот вопрос рассматривается в контексте сравнения когнитивных функций (память, языковые навыки, способность к ориентации в пространстве и т.д.) и музыкальных способностей музыкантов и не-музыкантов, а также влияния прослушивания музыки и занятий музыкой на когнитивные функции (Deutsch, 2013).

В качестве четвертого направления можно выделить исследования, изучающие терапевтическое применение музыки для коррекции различных патологических состояний и реабилитации. Отдельно стоит выделить использование музыки в процедурах тренировок по принципу биологической обратной связи. Отмечено, что музыкальные воздействия могут обладать повышенной эффективностью, если они согласуются с биоэлектрическими характеристиками нервной системы (Федотчев, Радченко, 2013).

Показано, что использование музыки в качестве информационного сигнала обратной связи способствует нормализации и коррекции стрессовых состояний (Федотчев и др., 2015). Относительно недавно возникла модификация этого метода, в которой предлагается использовать преобразование биопотенциалов человека в музыкальный сигнал в реальном времени в процессе процедуры (Константинов и др., 2014; Федотчев и др., 2016).

Перечисленные выше подходы, как правило, используют либо отдельные акустические тона, либо существующие музыкальные фразы или произведения целиком. Гораздо меньше внимания уделяется выяснению механизмов воздействия на организм человека конкретных мелодических и ритмических элементов музыки.

Основными аспектами музыки являются тональные отношения между музыкальными звуками (тональное пространство), а также метр и ритм (организация звуков во времени). Ключевым фактором восприятия мелодий и гармоний является тональная система отсчета, которую обычно называют гаммой. В классической европейской музыке доминирует диатоническая гамма, ноты которой отличаются как по звуковысотности, так и по уровню притяжения к тональному центру - тонике (первой ноте гаммы). Общепринятая формула тонального синтаксиса состоит из трех трезвучий, построенных на диатонических ступенях гаммы I-IV-V-I. Переориентация диатонической гаммы с одной тоники на другую, то есть переход из одной тональности в другую в пределах той же самой композиции, называется тональной модуляцией (Дубовский и др., 1965, Способин, 1969).

Именно особенности физиологических эффектов тональной модуляции стали основной целью настоящего исследования.

Цель исследования

Выявление закономерностей и нейрофизиологических механизмов обработки тональной модуляции в музыкальных стимулах на основании показателей биоэлектрической активности мозга и вегетативной регуляции.

Задачи исследования

1. Сравнение спектральных характеристик RR интервалов электрокардиограммы (ЭКГ) в процессе прослушивания музыкальных произведений с различными характеристиками музыкальной выразительности.
2. Оценка спектральных и топографических характеристик электроэнцефалограммы (ЭЭГ) при прослушивании гармонических последовательностей, содержащих

тональные модуляции во всех возможных вариациях расстояния модуляции и ладового условия.

3. Выявление закономерностей в реакциях биоэлектрической активности мозга на музыку путем сравнения спектральных характеристик ЭЭГ при прослушивании фрагментов классических музыкальных произведений и гармонических прогрессий с модуляциями в доминанту, субдоминанту и сексту.
4. Сравнение амплитудно-временных характеристик волн N200 и P600 событийно-связанных потенциалов при обработке близких и дальних тональных модуляций.

Положения, выносимые на защиту

1. Кратковременное прослушивание классических музыкальных произведений приводит к широкому спектру изменений тонуса вегетативной нервной системы, результат которых зависит от исходного типа вегетативной регуляции и структуры спектра variability сердечного ритма.
2. Близкое расстояние тональной модуляции и мажорное лаговое условие вызывают меньший уровень функциональной активности корковых структур по сравнению с минорным лаговым условием и дальним расстоянием, изменения уровня функциональной активности более устойчивы при наличии дополнительных средств музыкальной выразительности в прослушиваемых фрагментах.
3. Нейрофизиологическая обработка тональной модуляции, независимо от ее расстояния, происходит через 150-250 мс после прослушивания и проявляется в уменьшении амплитуды волны N200 во фронто-центральных областях коры. Обработка тонального расстояния происходит через 550-650 мс после прослушивания и проявляется в увеличении амплитуды волны P600 во фронтальных областях коры в ответ на увеличение расстояния тональной модуляции.

Научная новизна

Показано, что испытуемые с исходным парасимпатическим типом вегетативной регуляции («ваготоники») в большей степени подвержены изменению типа вегетативной регуляции при прослушивании эрготропного (активирующего) музыкального произведения, и данные изменения носят у них более устойчивый характер. Схожая динамика наблюдается для испытуемых с исходным симпатическим типом регуляции («симпатотоники»), прослушавших тропотропное (успокаивающее) музыкальное

произведение. Отмечается, что исходная структура спектра ВСР может выступать в качестве параметра, определяющего ее динамику во время прослушивания музыки.

Установлено, что при прослушивании фрагментов с начальными мажорными ладовыми условиями отмечается больший уровень синхронизации корковых структур на частоте альфа ритма в височных и центральных отведениях. При прослушивании фрагментов с дальним расстоянием тональной модуляции отмечен больший уровень бета и тета синхронизации и меньший уровень альфа синхронизации.

Установлено, что прослушивание гармонических последовательностей и фрагментов классических музыкальных произведений вызывает событийно связанную синхронизацию колебаний биопотенциалов коры в частотном диапазоне альфа ритма. При прослушивании фрагментов музыкальных произведений с модуляцией в доминанту отмечается меньший уровень синхронизации колебаний биопотенциалов в альфа диапазоне по сравнению с другими модуляциями. По сравнению с гармоническими последовательностями, прослушивание отрывков из классической музыки приводит к меньшему снижению синхронизации колебаний биопотенциалов в альфа диапазоне после прослушивания.

Обнаружено уменьшение амплитуды волны N200 при прослушивании гармонических последовательностей вне зависимости от степени модуляции. Выявлен рост амплитуды P600 в ответ на увеличение тонального расстояния между начальной и конечной тониками.

Теоретическая и практическая значимость

Исследовано влияние восприятия тональной модуляции на характеристики электроэнцефалограммы и вариабельности сердечного ритма. Выявлены эффекты мажорных и минорных ладовых условий и зависимость этих эффектов от степени модуляции.

Полученные электрофизиологические данные способствуют лучшему пониманию нейрофизиологических механизмов обработки тональной модуляции и открывают возможности более эффективного применения музыки и музыкоподобных сигналов в качестве средства развития когнитивных способностей и коррекции патологических состояний. Особенно важным это представляется для реабилитационных процедур биоуправления с обратной связью, где использование полученных данных позволит повысить эффективность лечения.

Получены амплитудно-временные характеристики нейрофизиологических процессов обработки тональных модуляций и их расстояния, что открывает возможности для дальнейшего исследования механизмов обработки музыкального синтаксиса.

Апробация и апробация работы

По теме диссертации опубликовано 24 печатных работы, из них 5 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, 7 статей в сборниках и 12 тезисов докладов.

Результаты доложены на 7 Международных и 8 Всероссийских (включая XXI Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова и V Съезд биофизиков России) конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста и имеет следующую структуру: введение, обзор литературы, описание и обоснование материала и методов исследования, главы с результатами собственных исследований, заключение, выводы, список литературы и приложение. Текст диссертации содержит 31 рисунок и 26 таблиц. Библиографический список включает 176 источников, из них 141 – иностранных.

Материалы и методы исследования

Участники эксперимента: В эксперименте по исследованию влияния исходных параметров вегетативной регуляции на результат прослушивания музыкальных произведений (далее экспериментальная серия 1) приняло участие 82 добровольца в возрасте от 17 до 26 лет. В экспериментах по исследованию влияния ладового условия и расстояния тональной модуляции на спектральные показатели ЭЭГ (далее экспериментальная серия 2) и влияния тональной модуляции на спектральные показатели ЭЭГ при прослушивании гармонических последовательностей и фрагментов классических музыкальных произведений (далее экспериментальная серия 3) приняло участие 15 добровольцев в возрасте от 17 до 28 лет. Все добровольцы участвовали в обеих экспериментальных сериях. В исследовании обработки расстояния тональной модуляции с применением техники регистрации событийно связанных потенциалов (ССП) (далее экспериментальная серия 4) приняло участие 20 человек, в возрасте от 17 до 22 лет.

Стимульный материал: В экспериментальной серии 1 в качестве стимульного материала использовался отрывок из произведения Рихарда Вагнера «Полет Валькирии» и отрывок из произведения Иоганна Себастьяна Баха «Концерт для фортепиано фа-минор. Соч. 2». По совокупности средств музыкальной выразительности произведение Рихарда Вагнера относится к эрготропным (активирующее), а произведение Иоганна Себастьяна Баха к трофотропным (успокаивающее) (Декер–Фойгт, 2003).

В экспериментальной серии 2 испытуемым предлагалось прослушать набор из 48 аудио фрагментов. Фрагменты состояли из набора коротких музыкальных фраз, по одной фразе для каждой из 12 степеней модуляции, включая не-модулирующее условие. Начала и окончания этих основных фраз были модифицированы так, что получились четыре варианта модуляций для той же самой ступени: из мажора в мажор (М-М), из мажора в минор (М-м), из минора в мажор (м-М) и из минора в минор (м-м). Таким образом, были получены все возможные ладовые версии для каждой из 12 степеней модуляции (12 степеней для 4 возможных ладовых условий).

В экспериментальной серии 3 в качестве стимулов были использованы короткие гармонические последовательности и отрывки из классических музыкальных произведений. Каждый из этих стимулов модулировал в одну из трех ступеней мажорной диатонической гаммы: субдоминанту (5), доминанту (7) и пониженную сексту (8). Указанные ступени, являются наиболее часто встречающимися целями модуляций в мажорном ладу (Korsakova-Kreyn, Dowling, 2014).

В экспериментальной серии 4 испытуемым предъявлялся ряд гармонических последовательностей с тональной модуляцией в субдоминанту – близкая модуляция (замена 1 тона в начальной гамме), малую сексту – дальняя модуляция (замена 4 тонов) и тритон – дальняя модуляция (замена 6 тонов) и немодулирующая последовательность (нет замены тонов). Был подготовлен набор «нецелевых» стимулов, состоящий из аналогичного набора последовательностей, но с изменением тембра инструмента на 4й аккорд последовательности. Гармонические последовательности предъявлялись в случайном порядке, интервал между предъявлениями варьировался в диапазоне от 1500 до 2000 мс. Соотношение целевых и нецелевых стимулов составляло 80\20.

Процедура экспериментов:

Во время 1 серии у испытуемых проводилась регистрация фоновой ЭКГ до, во время и после предъявления отрывка из музыкального произведения. Длительность регистрации составила 3 минуты для каждой из проб («Фон до», «Прослушивание», «Фон после»). Перед началом записи и после ее окончания участники заполняли бланк методики САН.

Во 2 и 3 серии испытуемым предлагалось в случайном порядке прослушать 48 гармонических последовательностей (экспериментальная серия 2), 24 гармонические последовательности с модуляциями в доминанту субдоминанту и сексту, и фрагменты из

музыкальных произведений, содержащих аналогичные модуляции (экспериментальная серия 3).

В 4 серии участникам эксперимента предлагалось считать количество музыкальных фрагментов с изменениями тембра (нецелевые стимулы), каждые 12 минут делался перерыв, во время которого проводилась проверка точности выполнения задания.

Параметры записи ЭЭГ и ЭКГ в экспериментах:

Запись ЭКГ осуществлялась сидя при помощи программно-аппаратных комплексов ЭЭГА – 21/26 «Энцефалан-131-03» и Нейрософт «ВНС Микро», регистрировался сигнал от I отведения.

Запись ЭЭГ осуществлялась при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21-26 «Энцефалан-131-03». Запись велась от 8 электродов (Т3, С3, Сз, С4, Т4, Р3, Рз, Р4) во 2 и 3 экспериментальной серии и от 19 электродов (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, Т3, С3, Сз, С4, Т4, Т5, Р3, Рз, Р4, Т6, О1, О2) в 4 серии, расположенных по стандартной схеме «10–20». Частота дискретизации – 250 Гц. Параметры фильтрации исходного сигнала: частота среза фильтра верхних частот – 0,5 Гц, частота среза фильтра нижних частот – 70 Гц, режекторный фильтр на частоте сети – 50 Гц. Значения импеданса не превышали 10 кОм. Для 4 экспериментальной серии проводилась регистрация вертикальной и горизонтальной ЭОГ и ЭКГ в I отведении.

Постобработка ЭЭГ и ЭКГ:

В экспериментальной серии 1 для оценки типа вегетативной регуляции использовался метод кардиоинтервалографии. С помощью быстрого преобразования Фурье рассчитывался спектр колебаний продолжительности R–R интервалов. Для анализа были использованы абсолютные и относительные значения мощностей в основных частотных диапазонах (HF: 0,15–0,40 Гц; LF: 0,04–0,15 Гц; VLF: 0,003–0,04 Гц) и значения коэффициента симпатико-парасимпатического баланса (LF/HF).

В сериях 2 и 3 для спектрального анализа ЭЭГ при прослушивании гармонических последовательностей использовались фрагменты записи за 10 секунд до предъявления аудио фрагмента («фон1»), 10 секунд во время предъявления аудио фрагмента и 10 секунд после предъявления аудио фрагмента («фон2»). Для спектрального анализа фрагментов классических музыкальных произведений использовались данные ЭЭГ за 10 секунд до

предъявления аудио фрагмента («фон1»), полное время предъявления аудио фрагмента и 10 секунд после предъявления аудио фрагмента («фон2»). Анализ проводился в диапазонах частот: тета (4-8 Гц), альфа (8-13 Гц), бета1 (13-21 Гц) и бета2 (21-35 Гц). Для статистической обработки использовались относительные значения мощностей.

В 4 серии проводился анализ каналов ЭОГ скользящим окном 200 мс, с исключением проб со стандартным отклонением выше 35 мВ, и анализ каждого ЭЭГ канала скользящим окном 500 мс, с исключением проб со стандартным отклонением выше 35 мВ. Применялся фильтр нижних частот с частотой среза 35 Гц. Полученный после фильтрации сигнал каждого испытуемого усреднялся для каждого стимула в момент проигрывания модулирующего аккорда прогрессии. Для каждой усредненной волны рассчитывались показатели средней амплитуды и фракционной латентности в интервалах 150-250 мс и 550-650 мс с момента начала звучания модулирующего аккорда.

Статистическая обработка полученных данных:

Статистическая обработка велась при помощи программ Microsoft Office Excel 2010 и Statistica 10.0. Для серии 1 вычислялись коэффициенты корреляции по Спирмену, t-критерий Стьюдента для зависимых и независимых выборок. Для серий 2 и 3 применялся W-критерий Уилкоксона для зависимых выборок, проводилась поправка на множественные сравнения с помощью метода Беньямини-Йекутили. Для серии 4 был проведен ANOVA с повторными измерениями с учетом следующих факторов: «Расстояние модуляции», «Зона» и «Латеральность». Фактор «Расстояние модуляции» включал в себя 4 степени модуляции, описанные выше. Фактор «Латеральность» включал в себя значения, полученные для электродов, сгруппированных по 5 латеральным осям: ось 1 – F7, T3, T5; ось 2 – F3, C3, P3; ось 3 – Fz, Cz, Pz; ось 4 – F4, C4, P4; ось 5 – F8, T4, T6. Фактор «Зона» включал в себя значения, полученные для электродов, сгруппированных по 3 зонам: фронтальная – F7, F3, Fz, F4, F8; центральная – T3, C3, Cz, C4, T4; парietальная – T5, P3, Pz, P4, T6. После проведения дисперсионного анализа применялась поправка Гринхауса-Гейсера и поправка Бонферони.

Результаты исследования

Экспериментальная серия 1:

Анализ вариабельности сердечного ритма испытуемых, прослушавших эрготропное музыкальное произведение, выявил достоверные различия ($p \leq 0.05$) устойчивости изменения типа вегетативной регуляции после прослушивания музыки. Под

устойчивостью в данном случае подразумевается доля испытуемых, сохранивших исходный тип вегетативной регуляции после прослушивания. Показано, что для испытуемых с исходной ваготонией изменения типа вегетативной регуляции во время и после прослушивания более устойчивы. В группах симпатотоников и ваготоников было выявлено достоверное различие в исходной структуре спектра variability между подгруппами с реакцией инверсии и подгруппами, сохранившими исходный тип вегетативной регуляции (Рис. 1). Для симпатотоников отмечаются достоверные различия VLF и HF диапазонов ($p \leq 0.01$ и $p \leq 0.05$ соответственно): для подгруппы с инверсией характерно доминирование HF диапазона и меньший вклад в общую структуру спектра VLF диапазона. Для ваготоников же характерно преобладание HF диапазона в отношении группы, сохранившей исходный тип вегетативной регуляции, и более высокая доля VLF диапазона у испытуемых с инверсией.

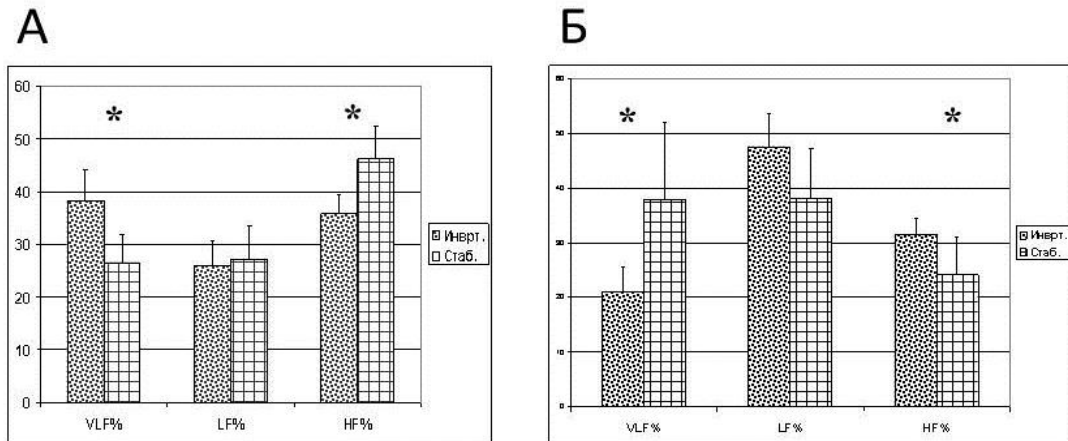


Рис. 1. Различия между исходным типом вегетативной регуляции и реакцией на прослушивание эрготропного музыкального произведения для испытуемых с исходной симпатотонией (А) и ваготонией (Б). Звёздочками обозначены достоверные различия.

Экспериментальная серия 2:

Сравнение относительных значений мощностей при прослушивании стимулов с мажорными (ММ) и минорными (мм) ладовыми условиями при близких и дальних модуляциях выявили следующие отличия: при близких модуляциях отмечается более низкий уровень мощности в бета2 диапазоне для стимулов с минорными ладовыми условиями (рис. 2), при дальних – более высокий уровень мощности в тета диапазоне и более низкий уровень мощности в альфа диапазоне для стимулов с минорными ладовыми условиями (Рис. 2).

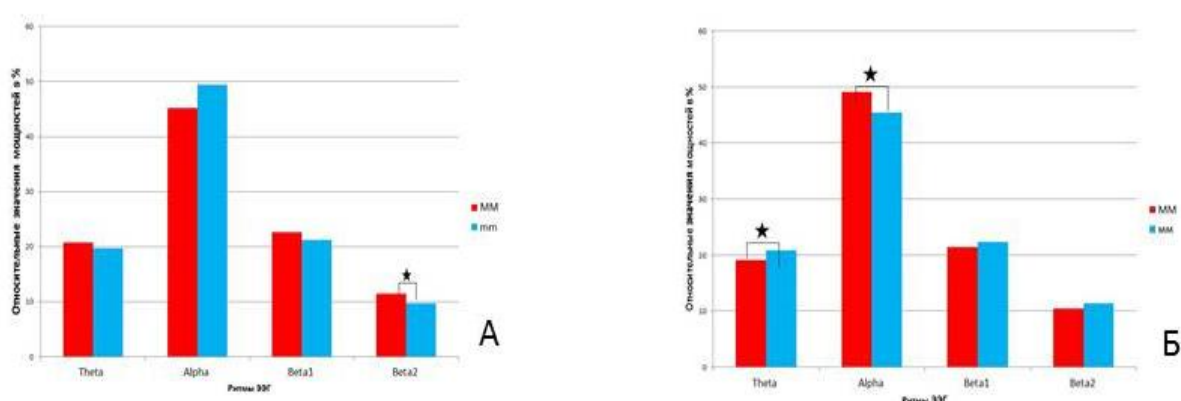


Рис. 2. Относительные значения мощностей ЭЭГ для последовательностей, содержащих мажорные (ММ) и минорные (мм) ладовые условия при близких (А) и дальних (Б) модуляциях. Здесь и далее звездочками обозначены достоверные различия ($p \leq 0,05$ по W-критерию Вилкоксона).

Аналогичное сравнение мощностей ЭЭГ при прослушивании стимулов с переходными ладовыми условиями (Мм и мМ) показало, что при прослушивании фрагментов с близкими модуляциями не было выявлено достоверных различий в относительных мощностях ЭЭГ, а при прослушивании фрагментов с дальними модуляциями выявлен более высокий уровень мощности в тета диапазоне и более низкий уровень в альфа диапазоне для стимулов с начальными минорными ладовыми условиями (Рис. 3).

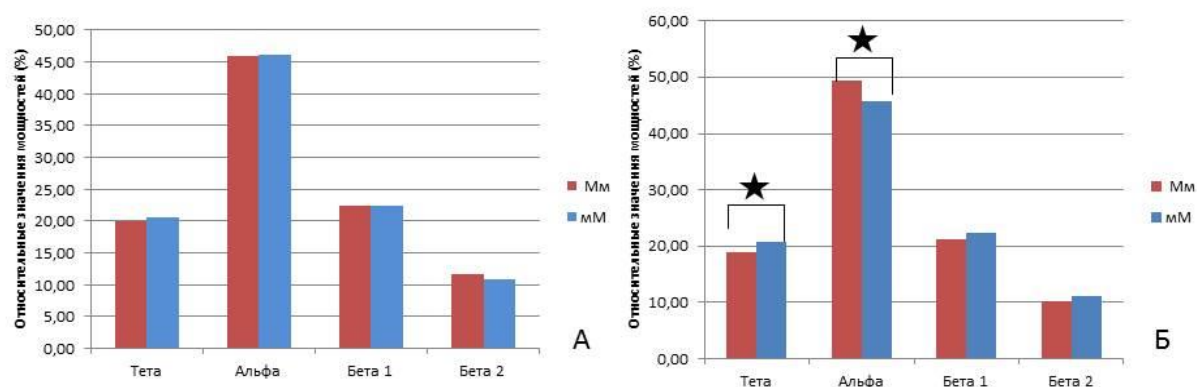


Рис. 3. Гистограмма относительных значений мощностей ЭЭГ при прослушивании гармонических последовательностей с переходными ладовыми условиями из мажора в минор (Мм) и из минора в мажор (мМ) при близких (А) и дальних (Б) тональных модуляциях.

Было проведено сравнение усредненных мощностей при группировке стимулов по начальной тональности. Отмечен больший уровень мощности в альфа диапазоне ($p \leq 0,05$) и меньший уровень в бета1 ($p \leq 0,05$) и тета ($p \leq 0,05$) диапазоне для последовательностей с начальной мажорной тональностью. Аналогичное сравнение мощностей для начальных мажорных и минорных тональностей было проведено для каждого из отведений. Был выявлен больший уровень мощности в альфа диапазоне для отведений С4-А2, С3-А1, Т4-А2 и Т3-А1 (рис. 4).

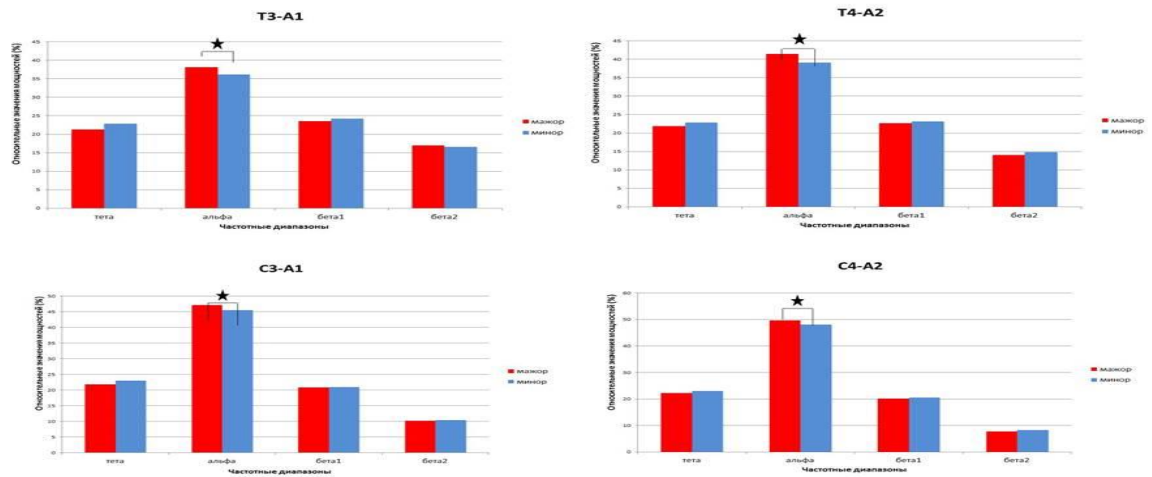


Рис. 4. Гистограммы относительных значений мощностей ЭЭГ при прослушивании гармонических последовательностей с начальным минорным и мажорным ладовым условием для височных (Т3-А1 и Т4-А2) и центральных отведений (С3-А1 и С4-А2).

Экспериментальная серия 3:

Попарное сравнение показателей мощности при прослушивании гармонических последовательностей с модуляцией в субдоминанту, доминанту и сексту не выявило значимых различий ни в одном из контекстов сравнения. Аналогичное сравнение отрывков из музыкальных произведений выявило различия при прослушивании отрывков с модуляциями в доминанту по сравнению с модуляциями в субдоминанту и сексту. Отрывки с переориентацией в доминанту приводили к меньшему увеличению мощности в альфа диапазоне по сравнению с субдоминантой и секстой, а также к большему увеличению мощности в бета2 диапазоне по сравнению с субдоминантой (Рис. 5).

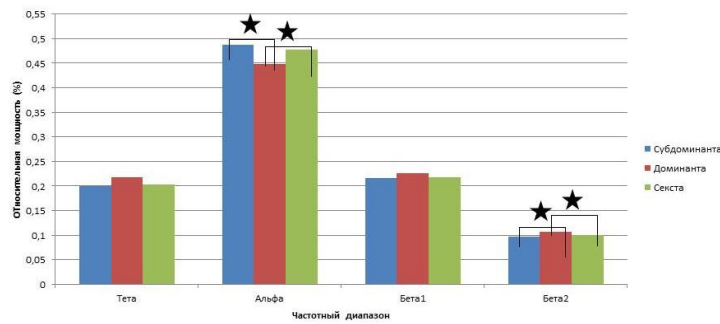


Рис. 5. Гистограмма относительных значений мощностей ЭЭГ при прослушивании отрывков музыкальных произведений с модуляцией в доминанту, субдоминанту и сексту. Здесь и далее звездочками отмечены достоверные различия по W-критерию Уилкоксона ($p \leq 0,05$).

Попарное сравнение мощностей ЭЭГ для разных ступеней модуляции в каждом отведении во время прослушивания отрывков музыкальных произведений выявило значимые отличия для фрагментов с модуляцией в доминанту. Для доминанты по сравнению с остальными ступенями отмечается меньший прирост мощности альфа диапазона в височных и теменных отведениях и больший прирост мощности в тета диапазоне в теменных отведениях (Рис. 6). В центральных отведениях достоверных различий не выявлено.

В то же время при попарном сравнении ступеней модуляции во время прослушивания между гармоническими последовательностями и фрагментами из музыкальных произведений не было выявлено значимых различий в спектральных характеристиках ЭЭГ.

При сравнении спектральных характеристик ЭЭГ до прослушивания отрывков из музыкальных произведений и гармонических последовательностей (без учета фактора ступени переориентации) отмечаются достоверные различия в тета и альфа диапазонах. Для гармонических последовательностей отмечается меньший уровень мощности в тета диапазоне и больший уровень мощности в альфа диапазоне. Этот результат может быть связан с тем, что серия с прослушиванием фрагментов из музыкальных произведений проводилась после серии с прослушиванием гармонических последовательностей.

После прослушивания отрывков из музыкальных произведений и гармонических последовательностей (без учета фактора ступени переориентации) при сравнении спектральных характеристик ЭЭГ отмечаются достоверные различия в тета и альфа диапазонах (Рис. 7). Для гармонических последовательностей отмечается меньший уровень мощности в альфа диапазоне и больший уровень мощности в тета диапазоне.

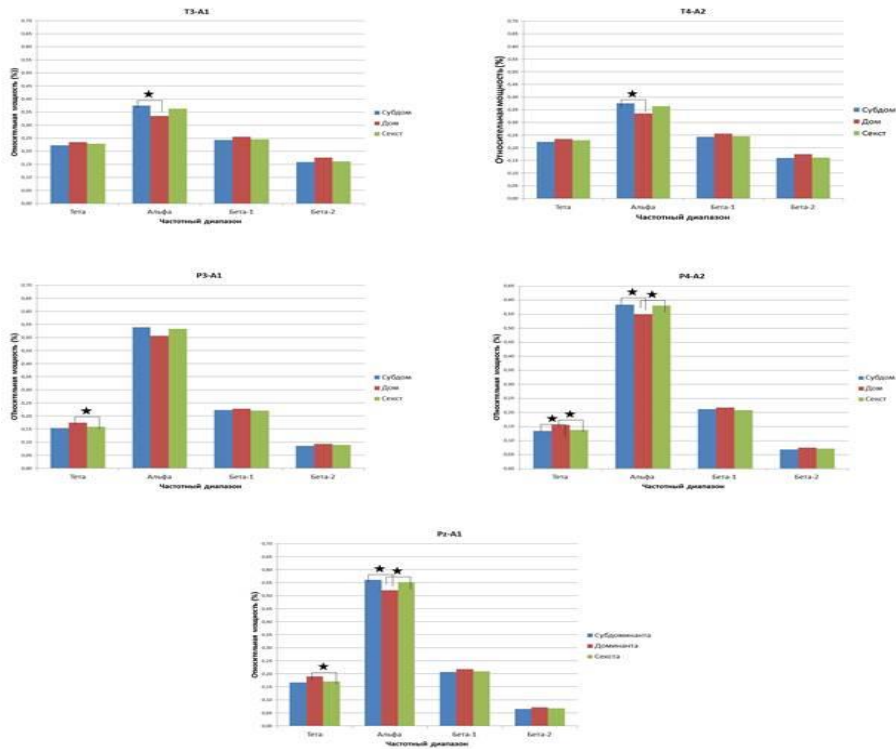


Рис. 6 Гистограмма относительных значений мощностей ЭЭГ при прослушивании отрывков музыкальных произведений с модуляцией в доминанту, субдоминанту и сексту для височных (Т3-А1 и Т4-А2) и теменных отведений (Р3-А1, Р4-А2, Рz-А1).

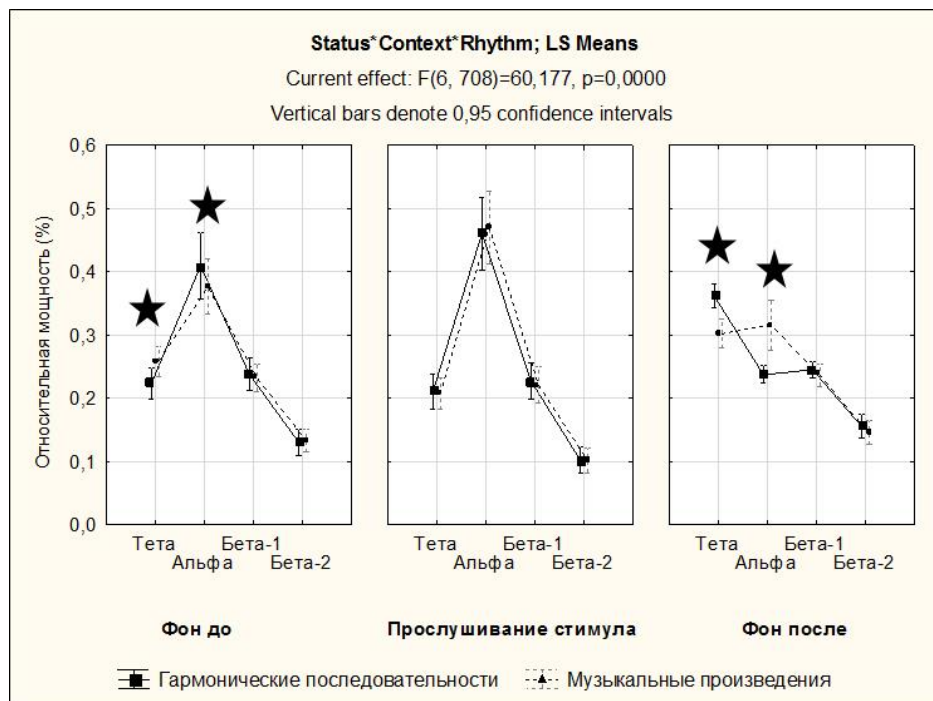


Рис. 7 Графики относительных значений мощностей ЭЭГ до, во время и после прослушивания гармонических последовательностей и отрывков музыкальных произведений.

Экспериментальная серия 4:

Дисперсионный анализ событийно-связанных потенциалов (ССП) для временного интервала 150-250 мс выявил значимые эффекты фактора «Расстояние модуляции» ($F(3, 810) = 37.957, p \leq 0.001$, после применения поправки Гринхауса-Гейсера $p \leq 0.001$), а также значимый эффект при взаимодействии факторов «Расстояние модуляции» и «Латеральность» ($F(12, 810) = 3.503, p \leq 0.001$, после применения поправки Гринхауса-Гейсера $p \leq 0.008$) на среднюю амплитуду волны N200. Отмечено снижение амплитуды волны N200 при прослушивании фрагментов с модуляциями по сравнению с нулевой степенью. Эти изменения наиболее выражены на центральной оси Fz, Cz, Pz (Рис. 8). Значимых отличий между амплитудами волны N200 для фрагментов с модулирующими аккордами выявлено не было (Рис. 8). Результаты дисперсионного анализа показателей фракционной латентности для временного интервала ССП 150-250 мс выявили значимый эффект фактора «Расстояние модуляции» ($F(3, 810) = 4.736, p \leq 0.002$, после применения поправки Гринхауса-Гейсера $p \leq 0.03$).

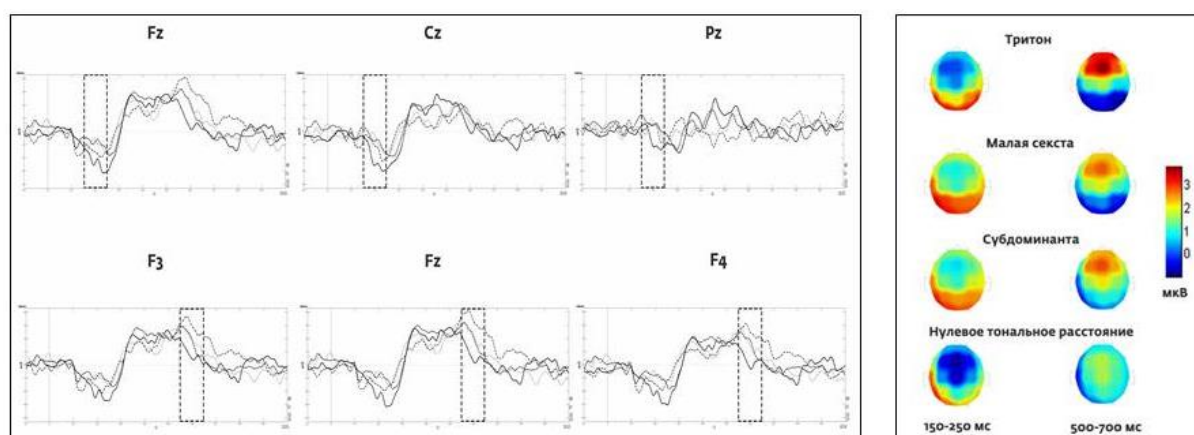


Рис. 8. Усредненные ССП (левый рисунок) и топологическая тепловая карта (правый рисунок) при прослушивании фрагментов с нулевым тональным расстоянием (сплошная линия), с модуляцией в субдоминанту (пунктирная линия), малую сексту (штриховая линия) и тритон (штрих-пунктирная линия). Пунктирной рамкой выделены временной интервал 150-250 мс (верхний ряд) и 550-650 мс (нижний ряд). Был применен фильтр нижних частот с частотой среза 35 Гц.

Для временного интервала ССП 550-650 мс был выявлен значимый эффект фактора «Расстояние модуляции» ($F(3, 810) = 12.933, p \leq 0.001$) и значимый эффект при взаимодействии факторов «Расстояние модуляции» и «Зона» ($F(6, 810) = 23.050, p \leq 0.001$). Отмечается увеличение амплитуды волны P600 в прямой зависимости от

расстояния модуляции во фронтальной зоне (Рис. 8). В париетальной зоне была получена обратная зависимость, отмечалось уменьшение амплитуды волны Р600 при увеличении расстояния модуляции. Результаты дисперсионного анализа показателей фракционной латентности для временного интервала ССП 550-650 мс не выявил значимых эффектов ни для одного из факторов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обобщая полученные результаты по различиям в исходной структуре спектра ВСП испытуемых с инверсией типа вегетативной регуляции и сохранивших его после прослушивания, можно заключить, что исходная структура спектра ВСП может выступать в качестве параметра, определяющего ее динамику во время прослушивания музыки. Достоверное снижение HF диапазона и повышение долевого вклада LF и VLF диапазонов у испытуемых с исходной ваготонией, прослушавших эрготропное музыкальное произведение, и достоверные различия экспериментальной и контрольной групп с инверсией позволяют предположить, что реакция испытуемых на прослушивание связана с центральными и гуморальными механизмами регуляции сердечного ритма. Для более детального анализа механизмов, лежащих в основе реакций центральной нервной системы на музыкальные воздействия, потребовалось изучение реакций биоэлектрической активности коры головного мозга (ЭЭГ) на музыку, предъявляемую в разных контекстах.

Мы выяснили, что прослушивание музыкальных фрагментов, независимо от ладового условия, вызывало снижение мощности ЭЭГ в диапазонах частот бета1 и бета2 и повышение мощности в альфа диапазоне, что может свидетельствовать об усилении синхронизации биопотенциалов коры на частоте альфа ритма. Данный феномен мы связываем с возникновением событийно связанной синхронизации (event related synchronization) в процессе прослушивания. Событийно связанную синхронизацию связывают (Klimesch et al., 2007; Bazanova, Vernon, 2014) с тормозным нисходящим (top-down) контролем, за счет которого происходит торможение незадействованных для текущей обработки областей коры, что позволяет более эффективно обрабатывать текущий сигнал. В ряде работ (Krause, 2006; Krause et al., 1996, 1997; Fingelkurts et al., 2003), отмечается, что кодирование акустической информации вызывает нарастание мощности в альфа диапазоне, а активное распознавание, напротив, ее подавление, причем оба феномена при этом характеризуются широким топографическим распределением синхронизации\десинхронизации и зависимостью от вида стимулов.

Результаты, полученные при сравнении эффектов от прослушивания фрагментов с начальными минорным и мажорным ладовыми условиями, выявили повышенный уровень синхронизации на частоте альфа ритма в височных и центральных отведениях. Можно отметить, что ладовое условие (минор\мажор), как правило, характеризует эмоциональную составляющую музыки (Peretz et al., 1998). Установлено, что при прослушивании минорных мелодий наблюдается большая, по сравнению с мажорными, активация структур лимбической системы, а именно парагиппокампальной извилины, билатеральной вентральной передней поясной извилины и левой префронтальной коры (Green et al., 2008). Эти результаты могут объяснять больший уровень мощности в тета диапазоне при прослушивании фрагментов с начальной минорной тональностью, поскольку тета диапазон связывают с таламо-кортикальным взаимодействием и с кодированием и хранением новой эпизодической информации (Klimesch et al., 2001; Tóth et al., 2012).

При сравнении спектральных характеристик ЭЭГ после прослушивания гармонических последовательностей и отрывков музыкальных произведений, без учета фактора степени модуляции, для гармонических последовательностей была отмечена меньшая мощность в альфа диапазоне и большая в тета диапазоне. Таким образом, несмотря на то, что непосредственно во время прослушивания статистически значимых различий между воздействиями искусственно сконструированных гармонических последовательностей и отрывков музыкальных произведений выявлено не было, эффект альфа синхронизации корковых структур, который оказывали отрывки музыкальных произведений, сохранялся значимо дольше после окончания прослушивания. Можно предположить, что дополнительные аспекты выразительности в музыкальных произведениях, которые были сведены к минимуму в гармонических последовательностях, способствовали этому эффекту. Данное предположение открывает перспективы дальнейших исследований.

Выявленное нами снижение амплитуды волны ССП N200 при обработке модулирующих аккордов расходится с результатами предыдущих исследований (Koelsch et al., 2003; Koelsch, Jentschke, 2008), в которых было установлено, что N200 увеличивалась при обработке тональных модуляций. Нами было показано значимое увеличение амплитуды в момент прослушивания заключительного аккорда в немодулирующей последовательности (нулевое тональное расстояние). Этот эффект может быть обусловлен несколькими факторами. В качестве первого фактора можно выделить то, что мы использовали неподготовленные модуляции (прерванные обороты), в которых музыкальные фразы завершались на неожиданном аккорде, в то время как в предыдущих

исследованиях использовались подготовленные модуляции, происходившие с помощью 3-4 переходных аккордов (Koelsch et al., 2003). В качестве второго фактора можно отметить наличие в нашем эксперименте градации модуляций по их степени (нулевая, близкая и далекая), в то время как в других исследованиях авторы оценивали эффекты модуляций без учета тонального расстояния между начальной и конечной тониками (Koelsch et al., 2003; Koelsch, Jentschke, 2008).

Нами также было выявлено увеличение амплитуды волны ССП Р600 в зависимости от расстояния модуляции: наибольшая амплитуда приходилась на внезапно появляющееся трезвучие на тритоне (дальняя модуляция), наименьшая – на заключительном трезвучии во фразах без модуляции (нулевое расстояние). Амплитуды Р600 в ответ на модуляции в субдоминанту и малую сексту между собой значимо не отличались, были значимо меньше амплитуды волны при модуляции в тритон и значимо больше при отсутствии модуляции. Данные изменения амплитуды были наиболее выражены во фронтальных отведениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно отметить, что полученные нами результаты свидетельствуют в пользу гипотезы о единых механизмах обработки музыкальных и языковых правил (Pattel et al., 1998). Можно отметить важность дальнейших исследований в этом направлении, поскольку они могут пролить свет на физиологические механизмы интегральной обработки процессов построения ментальных репрезентаций и правил. Дальнейшие наши работы мы планируем посвятить более глубокому изучению механизмов обработки музыкального синтаксиса и его сопоставлению с механизмами обработки других систем правил (таких, как языковой синтаксис, математические и геометрические правила).

В качестве перспективного применения полученных нами результатов стоит также отметить активно развивающиеся в последнее время технологии музыкального ЭЭГ-биоуправления и интерфейсов мозг-компьютер. Технология сочетает в себе принципы неосознаваемого восприятия, характерные для музыкальной терапии, и индивидуальный подход, характерный для процедур биоуправления (Федотчев, 2013, Федотчев, Радченко, 2013, Каплан и др., 2013). Преимущества данного подхода подтверждаются литературными данными о том, что музыкальные воздействия, индивидуально подобранные в соответствии с ЭЭГ характеристиками человека и использующие механизмы пластичности мозга, могут эффективно корректировать психические расстройства (Müller et al., 2014). Благодаря вовлечению сенсорных процессов, процессов

внимания, восприятия, памяти, а также мультисенсорной интеграции и активации эмоциональной сферы, музыкальные воздействия оказывают позитивное влияние на функциональное состояние и когнитивную деятельность человека. Можно предположить, что использование элементов тональной модуляции в качестве способа конструирования музыкаподобных сигналов для обратной связи будет способствовать повышению эффективности данных процедур.

Таким образом, можно констатировать, что полученные данные намечают перспективные пути к организации реабилитационных и коррекционных процедур, основанных на музыкальном биоуправлении с обратной связью по ЭКГ и ЭЭГ.

Выводы

1. Кратковременное прослушивание классических музыкальных произведений приводит к широкому спектру изменений тонуса вегетативной нервной системы, результат которых зависит от исходного типа вегетативной регуляции и структуры спектра вариабельности сердечного ритма.
2. Близкое расстояние тональной модуляции и мажорное ладовое условие вызывают меньший уровень функциональной активности подкорковых структур по сравнению с минорным ладовым условием и дальним расстоянием.
3. Изменения функциональной активности при прослушивании тональных модуляций более устойчивы при наличии дополнительных средств музыкальной выразительности в прослушиваемых фрагментах.
4. Нейрофизиологическая обработка тональной модуляции независимо от ее расстояния происходит через 150-250 мс и проявляется в уменьшении амплитуды волны N200, в то время как обработка тонального расстояния происходит через 550-650 мс и проявляется в увеличении амплитуды волны P600 в ответ на увеличение расстояния тональной модуляции.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

I. Публикации в журналах из перечня ВАК РФ

1. Федотчев А.И., Радченко Г.С. Музыкальная терапия и “музыка мозга”: состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиологических наук. Т. 44. № 4. 2013. С. 34-48.
2. Радченко Г.С., Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А., Федотчев А.И., Корсакова-Крейн М.Н. Влияние тональной модуляции музыкальных фрагментов на характеристики электроэнцефалограммы и вариабельности сердечного ритма // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. № 11. 2015. С. 65-71.

3. Федотчев А. И., Бондарь А. Т., Парин С.Б., Полевая С.А., Бахчина А.В., **Радченко Г.С.** Эффекты музыкально-акустических воздействий, управляемых ЭЭГ осцилляторами субъекта // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, Т. 101. № 8. 2015. С. 970-977.
4. Федотчев А. И., Бондарь А. Т., Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А., **Радченко Г.С.** Музыкально-акустические воздействия, управляемые биопотенциалами мозга, в коррекции неблагоприятных функциональных состояний // Успехи физиологических наук, 2016. Т. 47. № 1. 2015. С. 69-79.
5. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Григорьева В.Н., Катаев А.А., Парин С.Б., **Радченко Г.С.**, Полевая С.А. Трансформация ЭЭГ - осцилляторов пациента в музыкоподобные сигналы при коррекции стресс-индуцированных функциональных состояний // Современные технологии в медицине. Т. 8. № 2. 2016. С. 6-13.

II. Статьи в сборниках

6. **Радченко Г.С.** Влияние прослушивания музыкального произведения на динамику показателей variability сердечного ритма // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011. / Труды Всероссийской конференции. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. С. 264-265.
7. **Радченко Г.С.**, Дуденков А.А. Влияние прослушивания музыки на динамику показателей variability сердечного ритма // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013. / Труды III всероссийской конференции.: Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2013. С. 129-130.
8. **Радченко Г.С.** Влияние исходных параметров вегетативной регуляции на результат прослушивания классических музыкальных произведений // Естественно-научный подход в современной психологии/ Отв. ред. В.А. Барабанщиков. М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2014. С. 296-301.
9. Громов К.Н., **Радченко Г.С.**, Федотчев А.И., Корсакова-Крейн М.Н. ЭЭГ-корреляты ступени переориентации тональной схемы в контролируемых музыкальных стимулах и фрагментах классических произведений // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях - 2015. / Труды IV Всероссийской конференции. Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2015. С. 64-67.
10. **Радченко Г.С.**, Бахчина А.В., Парин С.Б. Психофизиологические корреляты восприятия движения в мелодическом пространстве // Психология XXI века: академическое прошлое и будущее: Материалы международной научной конференции молодых ученых, 20–23 апреля 2015 г. / СПб.: Скифия-принт. 2015. С. 165-167.
11. **Радченко Г.С.**, Громов К.Н. Влияние характеристик тональной модуляции на параметры ЭЭГ в контексте искусственных гармонических последовательностей и фрагментов реальных музыкальных произведений // Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 16 июня 2015 г. Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман. / Н: ООО «Буки Веди», ИППиП Москва. 2015. С. 108-113.
12. **Радченко Г.С.**, Парин С.Б., Полевая С.А., Корсакова-Крейн М. Н., Федотчев А.И. Влияние характеристик тональной модуляции музыкальных фрагментов на показатели ЭЭГ // XVII Всероссийская научно-техническая конференция "Нейроинформатика - 2015": Сборник научных трудов. В 3-х частях. / М.: НИЯУ МИФИ, 2015. Ч. 1. С. 47-55.

III. Тезисы основных докладов

13. **Радченко Г.С.** Психофизиологический анализ влияния музыкального произведения на тип вегетативной регуляции // XXI Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова / М. – Калуга: Типография ООО "БЭСТ-принт", 2010. С. 511.
14. **Радченко Г.С.** Влияние исходного типа вегетативной регуляции на изменение variability сердечного ритма и субъективной оценки самочувствия в процессе прослушивания музыкального произведения // III Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010» Сборник материалов. / Москва, 2010. Том I. С. 165.
15. Полевая С.А., **Радченко Г.С.** Динамика вегетативной регуляции под действием музыки // Нейронаука для медицины и психологии. - Труды 7 Международного междисциплинарного конгресса. - Судак. Крым. Украина (3-13 июля 2011). М.: МАКС Пресс. 2011. С. 343.
16. Polevaya S.A., **Radchenko G.S.** Dynamics of vegetative regulation due to music influence. // Proceedings of International Workshop about Segregation and Integration in Music and Language.: Eberhard Karls Universitat Tübingen. 2012. P. 31.
17. **Radchenko G.S.**, Parin S.B., Polevaya S.A., Korsakova-Krein M.N., Fedotchev A.I. EEG correlates of perception of tonal modulation in musical fragments // International Journal of Psychophysiology. V. 2. № 94. 2014. P. 192.
18. **Радченко Г.С.**, Парин С.Б., Полевая С.А., Корсакова-Крейн М.Н., Федотчев А.И. Влияние тональной модуляции музыкальных фрагментов на показатели ЭЭГ // Нейронаука для медицины и психологии. – Труды 11 Международного междисциплинарного конгресса. - Судак, Крым, Россия (2-12 июня 2015). М.: МАКС Пресс. 2015. С. 323-324.
19. Громов К.Н., **Радченко Г.С.** Влияние тональной модуляции музыкальных фрагментов на характеристики ЭЭГ // V Съезд биофизиков России. Материалы докладов: в 2 т.: Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. Т.2. С. 308.
20. **Радченко Г.С.**, Парин С.Б. ЭЭГ корреляты восприятия ладового условия и расстояния модуляции музыкальных фрагментов // Проблемы психологии глазами студентов: сборник статей по материалам 4 и 5 Межвузовских студенческих научно-практических конференций. / Н. Новгород: Мининский университет, 2015. С. 129-130.
21. **Radchenko G.S.**, Parin S.B., Polevaya S.A., Korsakova-Krein M.N., Fedotchev A.I. Influence of characteristics of tonal modulation of musical fragments on EEG // Сборник докладов конференции Association of psychological science 27 annual convention: Электронный ресурс – Режим доступа: <http://www.psychologicalscience.org/index.php/convention/2015-convention-program#.VfbEFNLtIbc> - (Дата обращения: 14.09.2015). 2015. P. Электронный ресурс.
22. Громов К.Н., **Радченко Г.С.**, Корсакова-Крейн М.Н., Федотчев А.И. Эффекты тональной модуляции при прослушивании гармонических прогрессий и отрывков музыкальных произведений: ЭЭГ исследование // Седьмая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. Светлогорск, 20-24 июня 2016 г. / Отв. ред. Ю.И. Александров, К.В. Анохин.: М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2016.- 720 с.. 2016. С. 241-242.
23. **Radchenko G.S.**, Gromov K.N., Korsakova – Krein M. N. Processing of distance of tonal modulation: An ERP study // International Journal of Psychophysiology: 2016. V. 108. P. 157-158.
24. **Radchenko G.S.**, Gromov K.N., Parin S.B., Korsakova - Krein M. N., Fedotchev A.I. Influence of tonal modulation on spectral characteristics of human EEG // International Journal of Psychophysiology: 2016. V. 108. P.88.