ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА, 2019, том 45, № 2, с. 29–36

УДК 612.858.745

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫ́Х ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛН N200 И P600 СОБЫТИЙНО-СВЯЗАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАССТОЯНИЯ ТОНАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ

© 2019 г. Г. С. Радченко[1, *], К. Н. Громов[1], М. Н. Корсакова-Крейн[2], А. И. Федотчев[3]

[1]*Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

[2]*Колледж Тауро (Колледж Лэндера для женщин), Нью-Йорк, США*

[3]*ФГБУН Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Россия*

**E-mail: radchenko.grigoriy@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2017 г.
После доработки 17.07.2017 г.
Принята к публикации 18.04.2018 г.

В данной работе с помощью техники регистрации событийно-связанных потенциалов (ССП), исследованы особенности нейрокогнитивных процессов при обработке расстояния тональной модуляции. В исследовании приняли участие 20 добровольцев (6 мужчин, средний возраст участников 19.7 ± 2.3 года). Все испытуемые были правшами; ни у кого из них не было профессиональной музыкальной подготовки. Испытуемым предлагалось прослушать ряд гармонических последовательностей с тональной модуляцией в субдоминанту (близкая степень модуляции, замена 1 тона по отношению к начальной гамме), в малую сексту (дальняя степень модуляции, замена 4 тонов по отношению к начальной гамме) и в тритон (дальняя модуляция, замена 6 тонов по отношению к начальной гамме). Для оценки эффекта модуляции использовалась последовательность без модуляции. Показано уменьшение амплитуды волны *N*200 при прослушивании гармонических последовательностей вне зависимости от степени модуляции. Было выявлено увеличение амплитуды *P*600 в ответ на увеличение тонального расстояния между начальной и конечной тониками, т.е., в ответ на увеличение степени модуляции. Это позволяет предположить, что амплитуда *P*600 связана с уровнем нарушения тональных ожиданий, что, в свою очередь, связано с возрастанием сложности при мысленной переориентации тональной схемы с начального тонального центра на новый тональный центр.

Ключевые слова: ССП, музыка, тональные ожидания, тональная модуляция, волна *N*200, волна *P*600.

DOI: 10.1134/S0131164619020103

Прослушивание и исполнение музыки задействует практически все когнитивные функции [1, 2], что отражается в широком спектре реабилитационных и развивающих процедур, использующих музыку и музыкоподобные сигналы [3–5]. Для повышения эффективности применения подобных процедур принципиально важным является изучение нейрокогнитивных механизмов обработки музыки и ее элементов.

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, т.е. переход из одной тональности в другую в пределах той же самой композиции, называется тональной модуляцией [6, 7]. Поскольку в диатонической гамме тона отличаются по уровню притяжения к тонике [8], то эта изначальная тональная иерархия задает различные варианты переориентации тональной схемы в тональном пространстве; а именно, переориентации тональной схемы отличаются по степени родства или согласованности между начальной и конечной тональностями. Уровень общности информации между начальной гаммой и конечной гаммой определяет расстояние тональной модуляции или степень родства тональностей: чем больше тонов заменяется в конечной гамме по отношению к начальной

гамме, тем больше расстояние между двумя тональностями, и тем меньше уровень “согласованности” между ними.

В предыдущих исследованиях было найдено, что обработка тональной модуляции ассоциируется с волной *N*200, или ранней право-передней негативностью (*Early Right-Anterior Negativity – ERAN* и *Early Anterior Negativity – EAN*) [9–11], и с волной *P*600 [12, 13]. Волну *N*200 (*ERAN*) связывают с обработкой уровня соответствия мелодии и гармонии [14] и с процессами гармонической интеграции [15]. Волну *P*600 связывают с обработкой лингвистического синтаксиса, так как она возникает в ответ на предъявление синтаксических нарушений в речи, например, при нарушении грамматики предложений и при прочтении грамматически правильных предложений, которые выстроены таким образом, что их интерпретация будет или неправильной или неоднозначной [16]. Данную волну также регистрируют в контексте задач, связанных с восприятием последовательностей (например, последовательностей из геометрических фигур), математическими правилами и с нарушениями музыкального синтаксиса [13, 17, 18]. Музыка определяется как “пространство тонов” [19], и существует общепринятое понимание геометрического представления тонального пространства в виде торуса [20], что позволяет отнести восприятие тональной модуляции (переориентации тональной системы отсчета на другой центр) к квази-пространственному явлению. Авторы данной статьи предполагают, что амплитудно-временны́е характеристики данных волн ССП отражают нейрокогнитивные процессы обработки тонального расстояния во время модуляции.

Целью данного исследования является изучение амплитудно-временны́х характеристик волн *N*200 и *P*600 в зависимости от степени тональной модуляции.

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 20 добровольцев (6 мужчин), средний возраст участников составил 19.7 ± 2.3 г. Ни один из них не являлся профессиональным музыкантом и не имел специального музыкального образования, за исключением общеобразовательной школьной программы. Перед участием в эксперименте каждый был ознакомлен и подписал форму добровольного информированного согласия на участие. Эксперимент организовали и проводили в соответствии с этическими нормами, установленными в соответствии с Хельсинкской декларацией (принятой в июне 1964 г. (Хельсинки, Финляндия) и пересмотренной в октябре 2000 г. (Эдинбург, Шотландия)).

Стимульный материал. Для эксперимента написали ряд гармонических последовательностей (рис. 1) с тональной модуляцией в субдоминанту (близкая модуляция, приводит к замене 1 тона в начальной гамме), малую сексту (дальняя модуляция, приводит к замене 4 тонов в начальной гамме) и тритон (дальняя модуляция, приводит к замене 6 тонов в начальной гамме). Для оценки эффекта модуляции использовали немодулирующую последовательность (нулевое тональное расстояние). Все фрагменты начинались и завершались в мажорной тональности, состояли из 8 аккордов, были одинаковы по ритму, темпу, продолжительности (9.6 с), интенсивности звука, тембру и частотному диапазону. Модуляция приходилась на последний аккорд последовательностей. Помимо этого подготовили набор стимулов, состоящий из аналогичного набора последовательностей, но с изменением тембра инструмента на 4-й аккорд последовательности.

Процедура эксперимента. Процедура эксперимента состояла из следующих этапов: инструктаж испытуемого, тренировочная серия, в ходе которой испытуемым предлагали прослушать все возможные варианты последовательностей, и экспериментальная серия, в ходе которой участникам эксперимента предлагали посчитать количество фрагментов с изменениями тембра во время прослушивания и в перерыве сообщить об этом экспериментатору. Во время экспериментальной серии испытуемым предъявляли набор гармонических последовательностей, состоящий из 240 последовательностей без изменения тембра инструмента (по 60 для каждого варианта последовательности) и 60 последовательностей с изменением тембра инструмента (по 12 для каждого варианта последовательности), соотношение последовательностей составляло 240/60. Все гармонические последовательности предъявляли в случайном порядке, интервал между стимулами варьировался в диапазоне от 1.5 до 2 с. В сумме с длительностью последовательностей интервал между модулирующими аккордами варьировался в диапазоне 9.9–10.4 с. В ходе экспериментальной серии каждые 12 мин делали перерыв, во время которого испытуемые могли отдохнуть и сообщить экспериментатору количество фрагментов с изменениями тембра. Гармонические последовательности предъявляли через наушники. Эксперимент подготовили с помощью ПО “*Presentation*” (версия 19.0, *Neurobehavioral Systems Inc.*, *Berkeley, CA, www.neurobs.com*).

Параметры записи электроэнцефалограммы. Запись электроэнцефалограммы (ЭЭГ) осуществляли при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21-26 “Энцефалан–131–03” компании “Медиком–МТД” (Таганрог, Россия). Запись велась от 19 электродов (Fp_1, Fp_2, F_7, F_3, Fz,

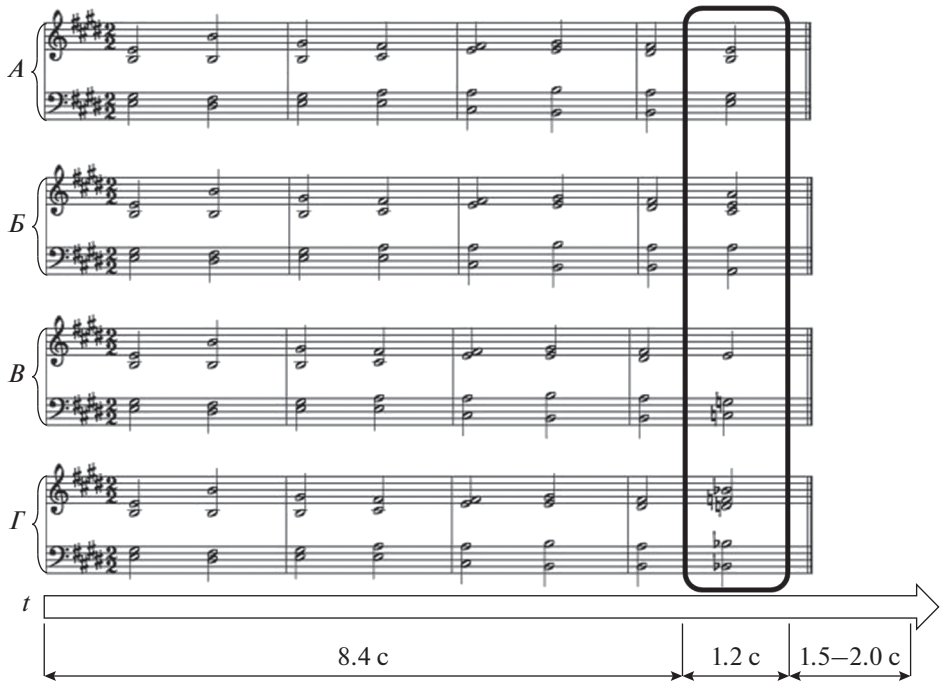

Рис. 1. Нотная запись используемых в эксперименте гармонических последовательностей.
Гармоническая последовательность без модуляции (*А*). Последовательности с модуляцией: в субдоминанту (*Б*) (близкая модуляция, замена 1 тона в начальной гамме), малую сексту (*В*) (дальняя модуляция, замена 4 тонов в начальной гамме) и тритон (*Г*) (дальняя модуляция, замена 6 тонов в начальной гамме). Модуляция приходилась на последний аккорд последовательностей. Рамкой выделены модулирующие аккорды. Стрелками обозначено время звучания аккордов последовательности до проигрывания модулирующего аккорда, время звучания модулирующего аккорда и длительность межстимульного интервала.

F_4, F_8, T_3, C_3, Cz, C_4, T_4, T_5, P_3, Pz, P_4, T_6, O_1, O_2), расположенных по стандартной схеме “10–20” с референтными электродами на мочках ушей и электродом заземления в вертексе. Частота дискретизации – 250 Гц. Использовали следующие параметры фильтрации исходного сигнала: частоту среза фильтра верхних частот – 0.5 Гц, частоту среза фильтра нижних частот – 70 Гц, режекторный фильтр на частоте сети – 50 Гц. Значения импеданса не превышали 10 кОм. Проводили регистрацию вертикальной и горизонтальной электроокулографии (ЭОГ) и электрокардиограммы (ЭКГ) в I стандартном отведение. Запись ЭЭГ осуществляли в положении сидя на кресле, с возможностью регулировки высоты спинки, подлокотников и высоты кресла относительно пола. Во время записи испытуемые находились в полной тишине в комнате без света, с закрытыми глазами.

Обработка ЭЭГ. Записи ЭЭГ обрабатывали при помощи ПО “*Brainstorm*” (версия 161110), распространяемой в рамках открытого лицензионного соглашения [20]. Для устранения влияния артефактов, вызванных движениями глаз, проводили анализ каналов ЭОГ скользящим окном 200 мс, пробы со стандартным отклонением выше 35 мВ исключали из дальнейшего анализа. Для устранения артефактов, вызванных движениями и дрейфом сигнала, проводили анализ каждого ЭЭГ-канала скользящим окном 500 мс и исключением проб со стандартным отклонением выше 35 мВ. Оставшиеся после автоматической фильтрации фрагменты просматривали экспериментаторы. Применяли фильтр нижних частот с частотой среза 35 Гц. По результатам пост-обработки записи 1 испытуемого исключали из дальнейшего анализа в связи с большим количеством проб, содержащих артефакты от движения глаз. Полученный после фильтрации сигнал каждого испытуемого усредняли для каждого стимула в момент проигрывания модулирующего аккорда последовательности. Время между аккордами, на которые регистрировали ССП составляло 11.1–11.6 с. Для каждой усредненной волны рассчитывали показатели средней амплитуды и фракционной латентности [22] в интервалах 150–250 и 550–650 мс с момента начала звучания модулирующего аккорда. Под фракционной латентностью подразумевается временна́я точка, делящая площадь под кривой на 2 заданные части (в данном случае использовали 50%) в соответствующем временно́м диапазоне. Проводили многомерный дисперсионный анализ с повторными измерениями (*ANOVA*) с учетом следующих факторов: “Рассто-

Таблица 1. Средние значения амплитуды волн *N*200 и *P*600 при прослушивании последовательностей с разным расстоянием тональной модуляции

Зона\ Латеральная ось	Средняя амплитуда, мкВ							
	*N*200				*P*600			
	нулевая ступень	субдоминанта	малая секста	тритон	нулевая ступень	субдоминанта	малая секста	тритон
Фронтальная	–1.4 (±2.3)	–0.6 (±1.7)	–0.5 (±1.5)	–1 (±1.7)	0.5 (±1.5)	1.5 (±1.4)	1.3 (±1.4)	2.4 (±2.0)
Центральная	–0.7 (±1.8)	–0.1 (±1.5)	–0.1 (±1.4)	–0.4 (±1.4)	0.4 (±1.3)	0.9 (±1.2)	0.7 (±1.3)	0.8 (±1.5)
Париетальная	–0.1 (±1.1)	0.3 (±1.1)	0.5 (±1.0)	0.2 (±1.0)	0.5 (±1.0)	0.4 (±0.9)	0.1 (±1.0)	–0.2 (±1.2)
Ось 1	0.4 (±1.7)	0.5 (±1.3)	0.3 (±1.4)	0.1 (±1.2)	0.15 (±1.0)	0.5 (±1.2)	0.4 (±1.2)	0.5 (±1.4)
Ось 2	–0.9 (±1.9)	–0.2 (±1.6)	–0.1 (±1.4)	–0.6 (±1.4)	0.7 (±1.4)	1.2 (±1.3)	0.9 (±1.3)	1.1 (±1.9)
Ось 3	–1.4 (±2.0)	–0.4 (±1.7)	–0.2 (±1.5)	–0.7 (±1.7)	0.7 (±1.5)	1.2 (±1.4)	1.0 (±1.4)	1.4 (±2.3)
Ось 4	–1.2 (±1.7)	–0.4 (±1.5)	–0.1 (±1.5)	–0.6 (±1.7)	0.4 (±1.4)	0.9 (±1.2)	0.6 (±1.2)	0.9 (±2.2)
Ось 5	–0.8 (±1.4)	–0.2 (±1.1)	–0.1 (±1.3)	–0.2 (±1.2)	0.3 (±1.2)	0.9 (±1.1)	0.4 (±1.5)	0.9 (±1.7)

яние модуляции”, “Зона” и “Латеральность”. Фактор “Расстояние модуляции” включал в себя 4 ступени модуляции, описанные выше. Фактор “Латеральность” включал в себя значения, полученные для электродов, сгруппированных по 5 латеральным осям: ось 1 – F_7, T_3, T_5; ось 2 – F_3, C_3, P_3; ось 3 – *Fz*, *Cz*, *Pz*; ось 4 – F_4, C_4, P_4; ось 5 – F_8; T_4; T_6. Фактор “Зона” включал в себя значения, полученные для электродов, сгруппированных по 3 зонам: фронтальная – F_7, F_3, *Fz*, F_4, F_8; центральная – T_3, C_3, *Cz*, C_4, T_4; париетальная – T_5, P_3, *Pz*, P_4, T_6. После проведения дисперсионного анализа применяли поправку Гринхауса–Гейсера и поправку Бонферони. Статистическую обработку вели с использованием программ *Microsoft Excel* 2010 и *Statistica* 6.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность выполнения испытуемыми тестового задания по детектированию изменений тембра при прослушивании фрагментов с модуляциями составила 95% правильных ответов.

Результаты дисперсионного анализа для временнóго интервала 150–250 мс показали значимые эффекты фактора “Расстояние модуляции” (F (3, 810) = 37.957, $p \le 0.001$, $ph \le 0.001$ (здесь и далее *ph* означает *p-value* после применения поправки Гринхаус–Гейсера)) и значимый эффект при взаимодействии факторов “Расстояние модуляции” и “Латеральность” (F (12, 810) = 3.503, $p \le 0.001$, $ph \le 0.008$) на среднюю амплитуду волны *N*200. Отмечено снижение амплитуды волны *N*200 при прослушивании фрагментов с модуляциями, по сравнению с нулевой ступенью. Эти изменения наиболее выражены на центральной оси *Fz*, *Cz*, *Pz* (рис. 2). Значимых отличий между амплитудами волны *N*200 для фрагментов с модулирующими аккордами выявлено не было. Дисперсионный анализ показателей фракционной латентности для временнóго интервала 150–250 мс выявил значимый эффект фактора “Расстояние модуляции” (F (3,810) = 4.736, $p \le 0.002$, $ph \le 0.03$). Средние значения амплитуды волны *N*200 приведены в табл. 1.

Для временнóго интервала 550–650 мс был выявлен значимый эффект фактора “Расстояние модуляции” (F (3, 810) = 12.933, $p \le 0.001$, $ph \le 0.001$) и значимый эффект при взаимодействии факторов “Расстояние модуляции” и “Зона” (F (6, 810) = 23.050, $p \le 0.001$, $ph \le 0.001$). Отмечается увеличение амплитуды волны *P*600 в прямой зависимости от расстояния модуляции во фронтальной зоне (рис. 3). В париетальной зоне была

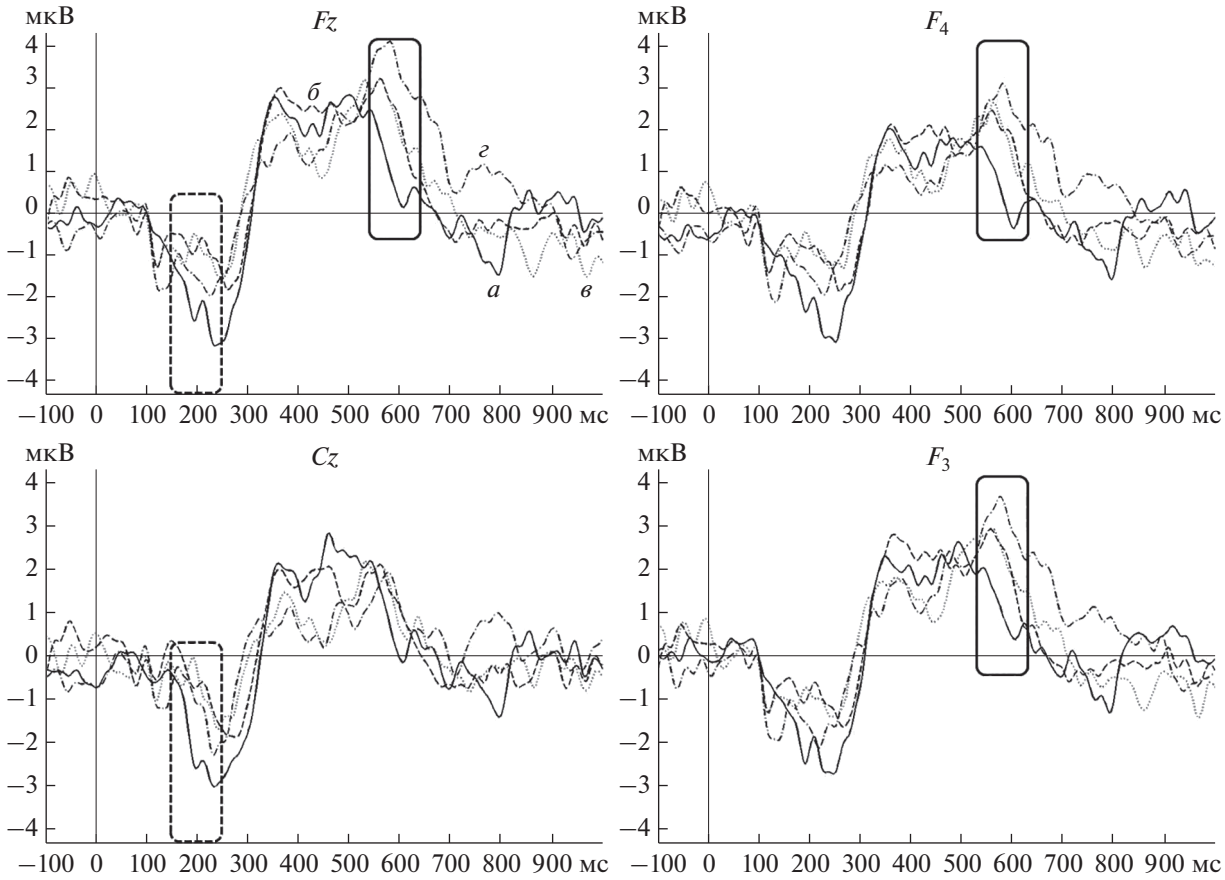

Рис. 2. Усредненные волны ССП в областях наиболее выраженных изменений волн *N*200 и *P*600 при прослушивании модуляций с нулевым тональным расстоянием (*а*), с модуляцией в субдоминанту (*б*), малую сексту (*в*) и тритон (*г*). Пунктирной рамкой выделен временно́й интервал 150–250 мс, сплошной рамкой интервал 550–650 мс. Был применен фильтр нижних частот с частотой среза 35 Гц.

получена обратная зависимость, отмечалось уменьшение амплитуды волны *P*600 при увеличении расстояния модуляции. Дисперсионный анализ показателей фракционной латентности для временно́го интервала 550–650 мс не выявил значимых эффектов ни для одного из факторов. Средние значения амплитуды волны *P*600 приведены в табл. 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Амплитуда волны *N*200 при обработке модулирующих аккордов была ниже по сравнению с амплитудой волны немодулирующей последовательности, что отличалось от результатов, полученных в предыдущих исследованиях [9, 10], в которых было найдено, что *N*200 была выше при обработке тональных модуляций.

Полученный результат может быть обусловлен несколькими факторами. В качестве первого фактора можно выделить то, что мы использовали неподготовленные модуляции (прерванные обороты), в то время как в предыдущих исследованиях использовались подготовленные модуляции, происходившие с помощью 3-х–4-х переходных аккордов [9]. 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 [9, 10]. Так же можно предположить, что увеличение амплитуды волны *N*200 в ответ на стимулы без модуляции связано с *oddball* парадигмой, при которой для испытуемых стандартными стимулами выступали последовательности с модуляцией (субдоминанта, малая секста и тритон), а девиантными – стимулы без модуляции (нулевое тональное расстояние). В этом случае наблюдаемое увеличение амплитуды можно связать с негативностью рассогласования при предъявлении девиантных стимулов (без модуляции) с частотой 25%. Подтверждением этой гипотезы так же служит то, что наблюдаемый эффект проявлялся главным образом во фронто-центральных отведениях [23]. Это позволяет предполагать, что нейрокогнитивная обработка степени тональной модуляции (близкая

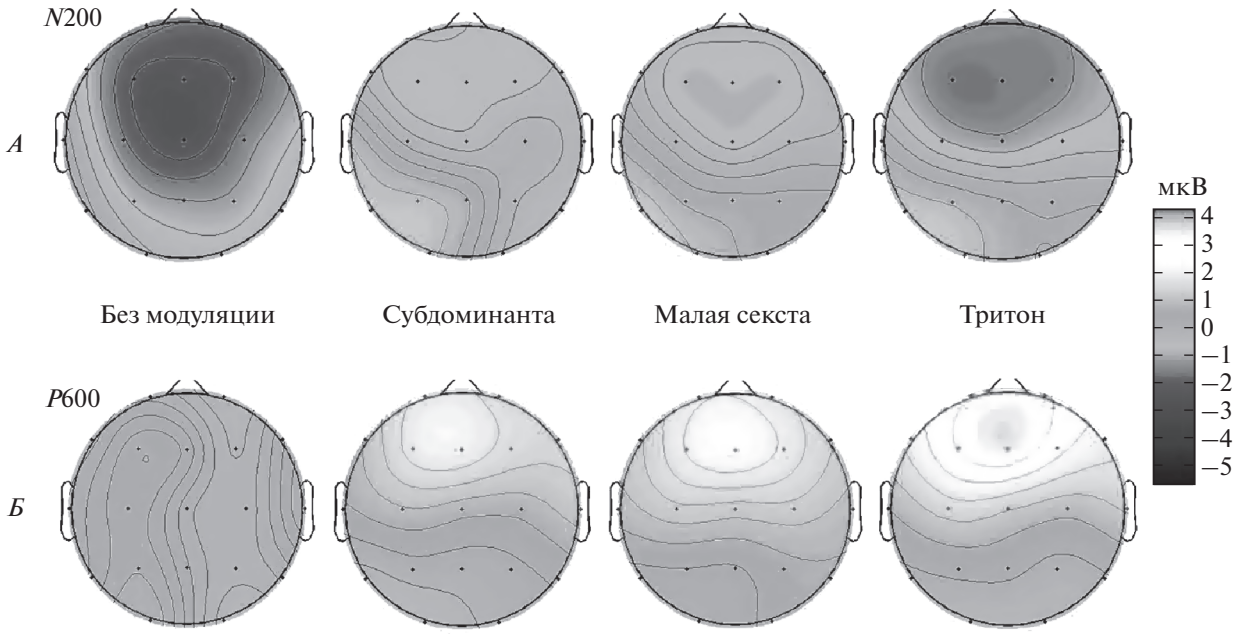

Рис. 3. Топологическая карта амплитуд волн *N*200 и *P*600 при прослушивании аккордов без модуляций, с модуляцией в субдоминанту, малую сексту и тритон.
Амплитуда волн отображена во временнóй точке 200 мс для волны *N*200 (*А*) и 596 мс для волны *P*600 (*Б*). Был применен фильтр нижних частот с частотой среза 35 Гц.

или далекая по тональному расстоянию) происходила на более поздних временах по сравнению с такими более "грубыми" отклонениями в структуре музыкальных фраз, как наличие или отсутствие модуляции как таковой; эти более ранние реакции на наличия/отсутствия модуляции были отражены волной *N*200.

В исследовании также было выявлено увеличение амплитуды *P*600 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 *P*600 в ответ на модуляции в субдоминанту и малую сексту между собой значимо не отличались и были значимо меньше амплитуды волны при модуляции в тритон и значимо больше при отсутствии модуляции. Данные изменения амплитуды были наиболее выражены во фронтальных отведениях. Т.е. амплитуда волны *P*600 образует градацию от наименьшей амплитуды при нулевом расстоянии до максимальной амплитуды для модуляции в тритон, и промежуточной амплитуды для модуляции в близкую субдоминанту и малую сексту (мажорная тональность на малой сексте – на диатонической ступени VI – принадлежит субдоминантовой сфере).

Основные предположения об интерпретации волны *P*600 происходят из области нейролингвистики, поскольку наиболее часто эта волна наблюдается при возникновении разного рода синтаксических аномалий. *S. Coulson et al.* [24] выдвигают предположение о том, что волна *P*600 отражает обработку "неправдоподобных" (не типичных) синтаксических элементов предложения и по своему механизму схожа с волной *P*3*b*, которую связывают с процессами идентификации и соответствия внешних событий внутренним представлениям, т.к. волна возникает в случае отклонений контекстно-значимого события от предсказанного результата. Было показано, что амплитуды волн *P*600 и *P*3*b* были чувствительны к изменениям вероятности предъявления синтаксических искажений в предложениях и степени выраженности этих искажений, при этом регистрировалось схожее пространственное распределение волн *P*600 и *P*3*b*. Авторы также отмечают, что волна *P*600 не специфична к модальности и не может напрямую соотноситься с обработкой синтаксиса; отсюда они высказывают предположение о том, что волна *P*600 возникает при нарушениях ментальной схемы, отражающей закономерности восприятия различных стимулов.

Таким образом, для речи этой схемой может выступать лингвистический синтаксис, для музыки – законы гармонии, для математики – математические законы. Применительно к нашим результатам, волна *P*600 может отражать степень нарушения правил гармонии при неподготовленном переходе в другую тональность, которая может быть или близкой или далекой по отношению

к начальной тональности. Важно отметить, что топология волны *P*600 в нашем эксперименте отличалась от топологии аналогичной волны, полученной в экспериментах *S. Coulson et al.* В нашем эксперименте волна *P*600 наиболее выражена в лобных отведениях, в то время как в экспериментах *S. Coulson et al.* она наблюдалась в теменных и затылочных отведениях. Это может объясняться различиями экспериментальных заданий, т.к. в нашем эксперименте прослушивание фрагментов с модуляциями было пассивным и проводилось на фоне задачи идентификации изменений тембра, в то время как в экспериментах *S. Coulson et al.* испытуемые читали предложения, предъявляемые на экране монитора, и им необходимо было отвечать на вопросы, связанные с пониманием прочитанного.

E. Kaan et al. [25] выдвигают предположение о том, что волна *P*600 отражает целый ряд характеристик синтаксической обработки. Предполагается, что волна *P*600 в теменных и затылочных областях отражает сложность синтаксической обработки, тогда как фронтальная волна *P*600 связана со степенью неоднозначности и уровнем сложности синтаксической обработки. При этом возникновение волны *P*600 в затылочных областях авторы связывают с процессами “восстановления” и “пересмотра”. Под “пересмотром” авторы подразумевают процессы повторного синтаксического анализа в ситуациях обработки синтаксически корректной, но неоднозначной по смыслу конструкции. “Восстановление” в свою очередь отражает процессы реконструкции грамматически неправильного предложения и создание синтаксически корректной его репрезентации. Делается заключение о том, что волна *P*600 связана с возникновением неоднозначности разрешения или с возрастанием сложности семантического анализа. В нашем эксперименте мы наблюдаем схожую топологию распределения волны *P*600 при прослушивании модуляций; расстояние модуляции в этом случае отражает степень выраженности нарушений музыкального синтаксиса (правил тональной гармонии). Мы можем предположить, что расстояние тональной модуляции является характеристикой, которая по аналогии с синтаксической и семантической обработкой, характеризует уровень сложности синтаксического анализа в музыке, хотя прямого равенства между ними поставить нельзя, поскольку синтаксис языка и музыки строится на разных принципах.

A.C. Gouvea et al. [26] исследовали амплитудно-временны́е характеристики волны *P*600 при обработке разных типов языковых синтаксических нарушений: нарушения грамматики, грамматически правильные предложения, содержащие смысловые нарушения, которые обнаруживаются после их полного прочтения и предложения, содержащие вопросительные местоимения. Можно отметить, что топология распределения волны *P*600 для всех типов языковых синтаксических отклонений одинаковая, а именно, волна наблюдается в теменных и затылочных отведениях. Авторы предполагают, что *P*600 отражает сложность структурных отношений при формировании мысленной схемы для обработки однородных синтаксических элементов, и что *P*600 может быть связана с процессами оценки соответствия новых элементов с уже сформированной синтаксической схемой. При этом латентность *P*600 отражает время, необходимое для обработки элементов, формирующих синтаксическую структуру, а амплитуда и продолжительность волны *P*600 можно рассматривать как функцию создания и разрушения ментальной схемы синтаксических отношений.

По результатам нашего исследования можно предположить, что волна *P*600 связана с процессами создания ментальной репрезентации, отражающей законы гармонии, а амплитуда волны отражает степень рассогласования обрабатываемых элементов с этой репрезентацией.

ВЫВОДЫ

1. Амплитуда волны *N*200 связана с обработкой тональной гармонии, и эта амплитуда уменьшается при обработке тональных модуляций независимо от степени или расстояния модуляции. Изменения в амплитуде волны *N*200 наиболее выражены на центральной оси *Fz*, *Cz*, *Pz*.

2. Увеличение амплитуды *P*600 во фронтальных отведениях связано с увеличением тонального расстояния между начальной тоникой и конечной тоникой при модуляции, что позволяет предположить, что амплитуда *P*600 связана с уровнем сложности обработки изменений в тональной схеме в процессе ее переориентации с одного тонального центра на другой.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-36-00099) и РГНФ (грант РГНФ № 16-06-00133).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федотчев А.И., Радченко Г.С.* Музыкальная терапия и музыка мозга: состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиол. наук. 2013. Т. 44. № 4. С. 34.
2. *Павлыгина Р.А., Давыдов В.И., Тутушкина М.В.* Влияние музыки на латентность распознавания четных чисел // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 2. С. 142.
3. *Константинов К.В., Леонова М.К., Мирошников Д.Б., Клименко В.М.* Особенности восприятия акустического образа собственной биоэлектрической активности головного мозга // Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. 2014. Т. 100. № 6. С. 710.
4. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Парин С.Б. и др.* Эффекты музыкально-акустических воздействий,

управляемых ЭЭГ осцилляторами субъекта // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2015. Т. 101. № 8. С. 970.
5. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В. и др.* Трансформация ЭЭГ осцилляторов пациента в музыкоподобные сигналы при коррекции стресс-индуцированных функциональных состояний // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8. № 2. С. 93.
6. *Дубовский И., Евсеев С., Способин И., Соколов В.* Учебник Гармонии. М.: Музыка, 1965. С. 436.
7. *Способин И.* Лекции по курсу гармонии. В литературной обработке. Ю. Холопова. М.: Музыка, 1969. С. 240.
8. *Krumhansl C.L., Kessler E.J.* Tracing the dynamic changes in perceived tonal organisation in a spatialrepresentation of musical keys // Psychological Review. 1982. V. 89. № 4. P. 334.
9. *Koelsch S., Gunter T., Schruger E., Friederici A.D.* Processing Tonal Modulations: An ERP Study // J. Cognitive Neuroscience. 2003. V. 15. № 8. P.1149.
10. *Koelsch S., Jentschke S.* Short-term effects of processing musical syntax: An ERP study // Brain Research. 2008. V. 1212. P. 55.
11. *Loui P., Grent-'t-Jong T., Torpey D., Woldorff M.G.* Effects of Attention on the Neural Processing of Harmonic Syntax in Western Music // Cognitive Brain Research. 2005. V. 25. № 3. P. 678.
12. *Brattico E., Jacobsen T., De Baene W. et al.* Cognitive vs. affective listening modes and judgments of music – An ERP study // Biological Psychology. 2010. V. 85. № 3. P. 393.
13. *Patel A.D., Gibson E., Ratner J. et al.* Processing syntactic relations in language and music: an event-related potential study // Journal of Cognitive Neuroscience. 1998. V. 10. № 6. P. 717.
14. *Lee S., Kim J.S., Seol J. et al.* Melody effects on ERANm elicited by harmonic irregularity in musical syntax // Brain Research. 2014. V. 1560. P. 36.
15. *Sammler D., Koelsch S., Friederici A.D.* Are left frontotemporal brain areas a prerequisite for normal music-syntactic processing? // Cortex. 2011. V. 47. № 6. P. 659.
16. *Kaan E., Harris A., Gibson E., Holcomb P.* The *P*600 as an index of syntactic integration difficulty // Language & Cognitive Processes. 2000. V. 15. № 2. P. 159.
17. *Carrus E., Pearce M.T., Bhattacharya J.* Melodic pitch expectation interacts with neural responses to syntactic but not semantic violations // Cortex. 2013. V. 49. № 8. P. 2186.
18. *Lelekov T., Dominey P.F., Garcia-Larrea L.* Dissociable ERP profiles for processing rules vs. instances in a cognitive sequencing task // Neuroreport: For Rapid Communication of Neuroscience Research. 2000. V. 11. № 5. P. 1129.
19. *Lerdahl F.* Tonal pitch space. N.Y.: Oxford University Press, 2001. P. 411.
20. *Purwins H., Blankertz B., Obermayer K.* Toroidal Models in Tonal Theory and Pitch-Class Analysis // Computing in Musicology (Tonal Theory for the Digital Age). 2007. V. 15. P. 73.
21. *Tadel F., Baillet S., Mosher J.C. et al.* Brainstorm: A User-Friendly Application for MEG/EEG Analysis // Computational Intelligence and Neuroscience. 2011. V. 2011. Article ID 879716. 13 p.
22. *Luck S.J.* An Introduction to the Event – Related Potential Technique. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. P. 374.
23. *Folstein J.R., Van Petten C.* Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP // Psychophysiology. 2008. V. 45. № 1. P. 152.
24. *Coulson S., King J., Kutas M.* Expect the Unexpected: Event-related Brain Response to Morphosyntactic Violations // Language and Cognitive Processes. 1998. V. 13. № 1. P. 21.
25. *Kaan E., Swaab T.* Repair, revision and complexity in syntactic analysis: an electrophysiological investigation // J. Cognitive Neuroscience. 2003. V. 15. № 1. P. 98.
26. *Gouvea A.C., Phillips C., Kazanina N., Poeppel D.* The linguistic processes underlying the P600 // Language and Cognitive Processes. 2010. V. 25. № 2. P. 149.

Investigation of Amplitude-Time Characteristics of the *N*200 and *P*600 Waves during Processing of the Distance of Tonal Modulation

G. S. Radchenko[a, *], K. N. Gromov[a], M. N. Korsakova-Kreyn[b], and A. I. Fedotchev[c]

[a] *Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia*

[b] *Touro College, Manhattan (Lander College), New-York, USA*

[c] *Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow region, Russia*

**E-mail: radchenko.grigoriy@mail.ru*

In this study we investigated neurocognitive processes during the perception of tonal modulation by using the technique of event-related potentials (ERPs). The participants were asked to listen to a series of brief harmonic progressions that ended with interrupted (unprepared) cadence on one of the following chromatic steps: the subdominant, the ascending minor sixth, and triton. The set of stimuli also included zero-step modulation to establish a baseline for the modulating stimuli. The data showed that *N*200 was decreased when listening to harmonic progressions. The amplitude of wave *P*600 is related to the level of deviation from the principal schema of tonal harmony during unprepared modulation. It was found that the amplitude of *P*600 depends on the tonal distance between the beginning and ending tonalities. An increase in the amplitude of P600 in response to an increase in tonal distance suggests that the amplitude of *P*600 corresponds to the degree of violation of tonal expectations.

Keywords: ERP, music, tonal modulation, *N*200, *P*600.