

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕЙРОИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2015

XVII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ с международным участием

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ЧАСТЬ 1

- **НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И КОГНИТИВНЫЕ НАУКИ**
- **ТЕОРИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**
- **НЕЙРОСЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ,
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И УПРАВЛЕНИЯ**

МОСКВА

Секция 1

Нейронные сети и когнитивные науки

**Г.С. РАДЧЕНКО¹, С.Б.ПАРИН¹, С.А. ПОЛЕВАЯ²,
М.Н. КОРСАКОВА-КРЕЙН³, А.И. ФЕДОТЧЕВ⁴**

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

²Нижегородская государственная медицинская академия
Министерства здравоохранения РФ

³Touro College and University System, New York

⁴Институт биофизики клетки РАН, Пушкино, Московская обл.
radchenko.grigoriy@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭЭГ¹

В работе исследовано влияние ладового условия модуляции музыкальных фрагментов и ее расстояния на характеристики электроэнцефалограммы. Были выявлены различия мажорных и минорных ладовых условий в зависимости от расстояния модуляции. Были обнаружены достоверные различия общей мощности в зависимости от степени модуляции для стимулов с однородными ладовыми условиями мажор-мажор и минор-минор.

Ключевые слова: *музыка, электроэнцефалограмма, тональная модуляция, тональное расстояние, ладовое условие.*

**G.S. RADCHENKO¹, S.B. PARIN¹, S.A. POLEVAYA²,
M.N. KORSAKOVA-KREYN³, A.I. FEDOTCHEV⁴**

¹N.I. Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

²Nizhny Novgorod State Medical Academy

³Touro College and University System, New York

⁴Institute of Cell Biophysics, Pushchino, Moscow region
radchenko.grigoriy@mail.ru

INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF TONAL MODULATION OF MUSICAL FRAGMENTS ON EEG

We investigate how conditions of modal modulation of musical fragments and distance of modulation influence on EEG characteristics. We found that

¹Работа выполнена при поддержке РГНФ проект 14-36-01024.

differences between major and minor mode conditions depend on the distance of modulation. We found significant differences in the total power that depend on the degree of modulation for stimuli with same mode condition major-major and minor-minor.

Keywords: *music, EEG, tonal modulation, tonal distance, mode condition.*

Введение

Музыка все больше применяется как средство терапии и коррекции состояний человека и реабилитации в различных областях психофизиологии, медицины и психологии. В связи с этим необходимо изучение влияния базовых элементов музыки на функциональное состояние человека. Достаточной большой пласт исследований в последнее время направлен на изучение особенностей восприятия музыки при различных акустических условиях [1], при этом игнорируется информационная составляющая восприятия музыки, которая связана, прежде всего, с восприятием движения в мелодическом пространстве. Тональная модуляция представляет собой смену тонального центра в рамках одной музыкальной композиции [2]. Этот прием является одним из главных структурных компонентов музыки и одним из ключевых средств выразительности в Европейской музыкальной культуре. В данной работе изучено влияние тональной модуляции на характеристики электроэнцефалограммы.

Процедура эксперимента

В исследовании приняли участие 15 студентов факультета социальных наук ННГУ им. Лобачевского обоего пола (5 мужчин и 10 женщин), в возрасте от 17 до 28 лет (средний возраст – $20,7 \pm 3,4$). Опыт игры на музыкальных инструментах и занятий вокалом имели 12 добровольцев (средняя продолжительность – $4 \pm 3,2$ года), ни один из них не являлся профессиональным музыкантом. Все участники эксперимента были правшами. Перед участием в эксперименте каждый испытуемый ознакомился и подписал форму добровольного информированного согласия на участие. Эксперимент был организован и проводился в соответствии с этическими нормами, установленными Хельсинской декларацией 1964 года.

Испытуемым предлагалось прослушать набор из 48 аудиостимулов. Стимулы были подготовлены следующим образом. Специально для этого эксперимента были написаны 12 коротких музыкальных фраз, по одной

фразе для каждой из 12 степеней модуляции, включая не-модулирующее условие, чтобы обеспечить базовые данные для сравнения с теми модуляциями, в которых происходил переход на другой тональный центр и в другой лад. Начала и окончания этих 12 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 возможных степеней модуляции

Каждая музыкальная фраза состояла из 8 аккордов. Первые три-пять аккордов устанавливали начальную тональность, и следующие за ними переходные аккорды совершали модуляцию в заключительную тональность посредством обычной каденции доминанта-тоники. Музыкальные фразы были похожи по темпу, стилю, громкости, тембру и фактуре. Стилистическое единообразие предотвращало интеракцию между ладом и фактурой [3; 4]. Фразы отличались по степени модуляции, по ритму и проходящим нотам (для плавности модуляции). Выбор начальной тональности в каждом музыкальном стимуле был произвольным. В зависимости от степени модуляции, некоторые из фраз потребовали меньшее количество переходных аккордов, чем другие. Все модуляции были плавными и не содержали каких-либо неожиданных сопоставлений между аккордами. Каждая музыкальная фраза составляла по продолжительности 11 секунд и включала небольшое замедление в конце для более естественного звучания. Последний аккорд продолжался 3 с, чтобы подчеркнуть заключительную тональность.

Для анализа стимулы были сгруппированы по следующим критериям.

1. Ладовое условие модуляции:

- a. из мажора в мажор (М-М),
- b. из мажора в минор (М-м),
- c. из минора в мажор (м-М),
- d. из минора в минор (м-м).

2. Тональное расстояние:

I. Близкие модуляции:

- a) 0, 5, 7 ступень для модуляции из мажора в мажор и из минора в минор;
- b) 0, 2, 4, 5, 9 ступени для модуляции из мажора в минор;
- c) 0, 3, 7, 8 ступени для модуляции из минора в мажор

II. Дальние модуляции:

- d) 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11 ступени для модуляции из мажора в мажор;
- e) 1, 6, 8, 10, 11 ступени для модуляции из мажора в минор;

- f) 1, 2, 6, 9, 10, 11 ступени для модуляции из минора в мажор;
- g) 1, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11 ступени для модуляции из минора в минор.

Тональное расстояние определялось по количеству тонов, заменяемых в гамме начальной тональности во время перехода в заключительную тональность, и по взаимоотношениям начального и заключительного тонических трезвучий.

Запись электроэнцефалограммы осуществлялась при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21\26 «Энцефалан-131-03» (модификация 10) и комплекта ЭЭГ электродов КЭ-ЭЭГ-10\20 (тип 19-3) компании Медиком-МТД (Таганрог, Россия). Схема монтажа отведений – BaseMonopolar, использовались следующие параметры фильтрации исходного сигнала: верхняя полоса пропускания – 70 Гц, нижняя полоса пропускания – 0,5 Гц, режекция сетевой наводки на частоте – 50 Гц, частота дискретизации – 250 Гц. Регистрация ЭЭГ осуществлялась по семи отведениям (Т3,С3,Сz,С4,Т4,Р3,Рz,Р4), уровень подэлектродного сопротивления на момент начала записи составлял не более 10 кОм.

Для анализа ЭЭГ использовалось программное обеспечение «Энцефалан-ЭЭГА». Вычислялся спектр мощности для следующих частотных диапазонов: тета (4–8 Гц), альфа (8–12 Гц), бета1 (13–24 Гц) и бета2 (25–35 Гц). Для спектрального анализа использовались данные ЭЭГ за 10 с до предъявления аудиофрагмента, 10 с во время предъявления аудиофрагмента и 10 секунд после предъявления аудиофрагмента, для статистической обработки использовались абсолютные значения мощностей (мкВ^2 – площадь под соответствующим участком спектрограммы по выбранным частотным диапазонам) и относительные значения мощностей (% – отношение площади под соответствующим участком спектрограммы к суммарной площади по выбранным частотным диапазонам, умноженное на 100 %). Для абсолютных значений мощностей применялась процедура нормализации (z-шкала).

Схема эксперимента включала в себя следующие этапы:

1. Инструктаж испытуемого и выполнение тестового прослушивания стимула и заполнения анкеты;
2. Регистрация исходного фона ЭЭГ (продолжительность – 3 минуты);
3. Экспериментальная серия (испытуемому в случайном порядке предъявлялся набор из 48 стимулов, после каждого стимула предлагалось заполнить анкету семантического дифференциала);
4. Регистрация конечного фона ЭЭГ (продолжительность – 3 минуты).

Статистическая обработка велась при помощи программ Microsoft Excel 2010 и Statistica 10. Вычислялись t -критерии Стьюдента для зависимых и независимых выборок.

Результаты исследования

При сравнении относительных значений мощностей мажорных (ММ) и минорных (мм) ладовых условий с фоном до стимуляции и с фоном после стимуляции были получены следующие результаты (табл. 1).

Для мажорных ладовых условий (ММ) при прослушивании музыкальных фраз по сравнению с фоном до прослушивания отмечается более высокий уровень мощностей в альфа диапазоне и более низкий уровень в бета1 и бета2 диапазонах, по сравнению с фоном после прослушивания отмечается более низкий уровень мощностей в тета и бета2 диапазонах и более высокий в альфа и бета1 диапазонах частот.

Таблица 1

Относительные значения мощностей ритмов ЭЭГ для мажорных (ММ) и минорных (мм) ладовых условий до, во время и после прослушивания стимулов

Экспериментальный контекст	Ритмы ЭЭГ %							
	Мажорное ладовое условие				Минорное ладовое условие			
	Тета	Альфа	Бета1	Бета 2	Тета	Альфа	Бета1	Бета2
До прослушивания	19,9 ² ±11,7	44,3 ² ±21,4	23,7 ±11,1	11,9 ² ±9,7	19,7 ² ±11,8	45,1 ² ±21,9	23,4 ² ±11,6	11,6 ² ±9,3
Во время прослушивания	19,6 ² ±10,6	47,8 ^{1,2} ±21,8	21,7 ^{1,2} ±10,9	10,6 ^{1,2} ±9,1	20,4 ² ±11,2	46,2 ² ±22	22,1 ^{1,2} ±11,3	11,1 ² ±9,7
После прослушивания	36,6 ±10,7	23,4 ±9,0	23,7 ±6,8	16,1 ±9,3	36,1 ±10,6	23,7 ±8,6	24,2 ±6,9	15,8 ±8,4

Примечание. Цифрами обозначены достоверные отличия ($p < 0,05$ по критерию Стьюдента) в сравнении: 1 – с фоном до прослушивания; 2 – с фоном после прослушивания.

Сравнение фоновых записей до начала прослушивания с фоновыми записями после прослушивания стимулов с мажорным ладовым условием

показало более высокий уровень мощностей в альфа диапазоне и более низкий уровень мощностей в тета и бета2 диапазонах для фона до прослушивания стимула.

Для минорных ладовых условий (мм) при прослушивании музыкальных фраз по сравнению с фоном до прослушивания отмечается более низкий уровень мощностей бета1 диапазоне, по сравнению с фоном после прослушивания отмечается более низкий уровень мощностей в тета, бета1 и бета2 диапазонах и более высокий в альфа. Сравнение фоновых записей до начала прослушивания с фоновыми записями после прослушивания стимулов с минорным ладовым условием показало более высокий уровень мощностей в альфа диапазоне и более низкий уровень мощностей в тета, бета1 и бета2 диапазонах для фона до прослушивания стимула.

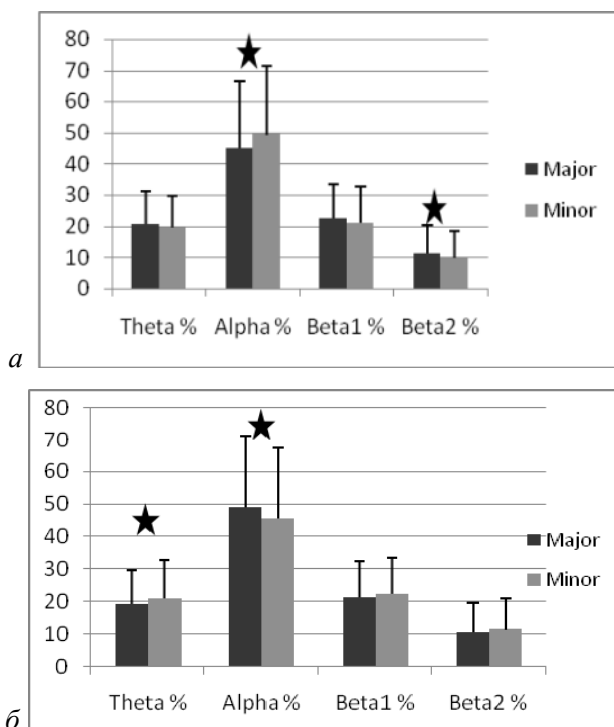


Рис. 1. Относительные значения мощностей для мажорных (ММ) и минорных (мм) ладовых условий при близких (а) и дальних (б) модуляциях. Звездочками обозначены достоверные различия ($p < 0,05$ по t -критерию Стьюдента)

При сравнении относительных значений мощностей для стимулов с мажорными (ММ) и минорными (мм) ладовыми условиями при близких и дальних модуляциях были выявлены следующие отличия. Для близких модуляций был выявлен достоверно более высокий уровень мощности в альфа диапазоне и достоверно более низкий уровень мощности в бета2 диапазоне для стимулов с минорными ладовыми условиями (рис. 1, а). Для стимулов с дальними модуляциями был отмечен достоверно более высокий уровень тета активности и достоверно более низкий уровень альфа активности для стимулов с минорными ладовыми условиями (рис. 1, б).

Был проведен анализ изменений общей мощности в зависимости от ступени модуляции для стимулов с однородными ладовыми условиями мажор-мажор и минор-минор (табл. 2).

Таблица 2

Нормализованные значения мощностей ЭЭГ в височных, центральных и теменных отведениях (z-шкала) для мажорных (ММ) и минорных (мм) ладовых условий в зависимости от ступеней модуляции

№ ступени	Мощности ЭЭГ (z-шкала)					
	ММ			мм		
	Тем.	Цен.	Вис.	Тем.	Цен.	Вис.
0	0,56±0,16	0,18±0,16	-0,74±0,16	0,55±0,17	0,30±0,17*	-0,85±0,17
1	0,60±0,14	0,27±0,14	-0,87±0,14	0,51±0,17	0,36±0,17	-0,87±0,17
2	0,70±0,13	0,30±0,13	-1,00±0,13	0,63±0,15	0,28±0,15	-0,91±0,15
3	0,53±0,17*	0,24±0,17	-0,77±0,17*	0,62±0,17	0,29±0,17	-0,91±0,17
4	0,53±0,17	0,28±0,17	-0,82±0,17	0,61±0,14*	0,28±0,14	-0,89±0,14*
5	0,60±0,16	0,26±0,16	-0,87±0,16	0,62±0,17	0,17±0,17	-0,79±0,17
6	0,66±0,15	0,25±0,15*	-0,91±0,15	0,56±0,14	0,36±0,14	-0,93±0,14
7	0,60±0,15*	0,27±0,15	-0,87±0,15	0,66±0,15	0,20±0,15*	-0,87±0,15
8	0,56±0,17	0,30±0,17	-0,86±0,17	0,51±0,17	0,36±0,17	-0,87±0,17
9	0,71±0,14	0,25±0,14	-0,96±0,14	0,53±0,17	0,24±0,17	-0,77±0,17
10	0,67±0,13*	0,27±0,13	-0,94±0,13*	0,61±0,17	0,25±0,17	-0,85±0,17
11	0,58±0,16	0,26±0,16	-0,83±0,16*	0,56±0,19	0,23±0,19	-0,79±0,19

*Достоверно различающиеся уровни мощностей ($p < 0,05$ по t -критерию Стьюдента).

Достоверно больший уровень мощности для минорного ладового условия был выявлен для 1 ступени модуляции в центральных и височных

отведениях, для 4 ступени модуляции в теменных и височных отведениях и для 7 ступени в центральных отведениях. Достоверно больший уровень мощности для мажорного ладового условия был обнаружен для 3 ступени в теменных и височных отведениях, для 6 ступени в центральном отведении, для 7 ступени в теменных отведениях, для 10 ступени в теменных и височных отведениях и для 11 ступени в височных отведениях. При других ступенях влияние ладового условия на пространственное распределение активности не наблюдалось.

Заключение

Прослушивание музыкальных фрагментов с мажорными ладовыми условиями (ММ) вызывает повышение мощности в альфа диапазоне и снижение мощностей в бета1 и бета2 диапазонах. Прослушивание музыкальных фрагментов с минорными ладовыми условиями (мм) вызывает снижением мощности в бета1 диапазоне. Это может говорить о повышении синхронизации корковых структур в ответ на прослушивание музыкальных фрагментов, что свидетельствует о снижении уровня напряжения и служит подтверждением полезного эффекта прослушивания музыки.

Изменения общей мощности спектра ЭЭГ во время прослушивания стимулов с мажорными (ММ) и минорными (мм) ладовыми условиями в наибольшей степени проявляются в височных зонах, а в наименьшей – в центральных. Мощность спектра ЭЭГ в височных зонах при минорной модуляции значительно ниже, чем при мажорной для 1 и 4 ступеней модуляции. Для 3, 10 и 11 ступеней наблюдается обратная ситуация: мажорные стимулы вызывают в височной зоне большую активацию. Изменения для 3 и 4 ступеней могут быть связаны с тем, что особенностью данных ступеней модуляции является присутствие характерных для противоположных тональностей переходных аккордов и последующий возврат в начальную тональность. Изменения для ступеней 1 и 11 могут быть связаны с характерным для них движением мелодического контура в обеих модуляциях (на полтона вверх для 1 ступени и на полтона вниз для 11 ступени). Изменения для 10 ступени могут быть связаны с понижением основного тона, которое характерно для данной ступени.

Были выявлены различия мажорных и минорных ладовых условий в зависимости от расстояния модуляции. Показано, что при близких модуляциях характерен больший уровень мощности в альфа диапазоне и меньший уровень мощности в бета2 диапазоне для фрагментов с минорными ладовыми условиями (мм). При дальних модуляциях для фрагментов с мажорными ладовыми условиями характерен более высокий уровень

мощности в альфа диапазоне и более низкий уровень мощности в тета диапазоне. Это может свидетельствовать о том, что при близком расстоянии модуляции минорные ладовые условия в большей степени способствуют синхронизации корковых структур и снижению уровня напряжения; в то время как при дальних модуляциях подобный эффект можно наблюдать уже для мажорных ладовых условий. Этот факт может быть крайне полезен для дальнейшего изучения эффектов от прослушивания музыки и для ее использования в средствах коррекции функциональных состояний организма. Дальнейшие исследования будут направлены на проверку этого эффекта в контексте прослушивания подготовленных музыкальных фрагментов со схожим набором параметров и отрывков из реальных музыкальных произведений.

Список литературы

1. Федотчев, А.И., Радченко, Г.С. Музыкальная терапия и "музыка мозга": состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиологических наук, 2013. Т. 44. № 4. С. 34-50.
2. Korsakova-Kreyn, M.N.; Dowling, W.J. Emotional processing in music: Study in affective responses to tonal modulation in controlled harmonic progressions and real music. // Psychomusicology: Music, Mind and Brain, Mar 2014. V. 24(1). P. 4-20.
3. Kastner, M.P., Crowder, R.G. Perception of the Major/Minor Distinction: IV. Emotional Connotations in Young Children// Music Perception: An Interdisciplinary Journal, Winter 1990. V. 8. No. 2. P. 189-201.
4. Webster, G.D., Weir, C.G. Emotional responses to music: Interactive effects of mode, texture, and tempo. // Motivation and Emotion, 2005. V. 29(1). P. 19-39.

С.В. БОЖОКИН, И.Б. СУСЛОВА

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
bsvjob@mail.ru, ibsus@mail.ru

НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ АНСАМБЛЯ ВСПЫШЕК ЭЭГ: ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

Построены модели вспышек активности ЭЭГ в виде суперпозиции элементарных нестационарных сигналов. С помощью непрерывного вейвлет-преобразования и спектральных интегралов рассчитаны новые количественные параметры, характеризующие изменение во времени спектральных свойств каждой отдельной вспышки мозговой активности и ансамбля вспышек. Решена задача о нестационарной корреляции различных