

Российская академия наук  
Институт прикладной физики РАН  
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований  
Российская ассоциация нейроинформатики  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Национальный исследовательский университет ВШЭ  
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры  
Нижегородская государственная медицинская академия  
ЗАО «Нижегородское агентство наукоемких технологий»

# **НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2015**

**ТРУДЫ  
IV ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижегород  
ИПФ РАН  
2015

# ЭЭГ корреляты ступени переориентации тональной схемы в контролируемых музыкальных стимулах и фрагментах классических произведений

К.Н. Громов<sup>1</sup>, Г.С. Радченко<sup>1</sup>, А.И. Федотчев<sup>2</sup>, М.Н. Корсакова-Крейн<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup> Институт биофизики клетки РАН, Пущино-на-Оке

<sup>3</sup> Tougu College, New York, USA

## Введение

Музыка все больше используется как средство терапии и коррекции состояний человека и реабилитации в различных областях психофизиологии, медицины и психологии [1]. В связи с этим актуально исследование влияния базовых элементов музыки на функциональное состояние человека. Знание того, как компоненты музыки воздействуют на человека, позволило бы точнее подбирать необходимые элементы музыки и более эффективно использовать ее как средство коррекции.

Исследования эмоциональных реакций на прослушивание музыки показывают изменения общих физиологических показателей, таких как ритмы сердца и дыхания [2], уровень электропроводимости кожи [3], и гормональные изменения [4], что указывает на отклик автономной нервной системы.

Восприятие музыки опирается на тональную систему отсчета, которую обычно называют гаммой [5]. В пространстве музыкального мира доминирует диатоническая гамма, тона в которой отличаются по звуковысотности и по уровню притяжения к тональному центру – тонике (первой ноте гаммы). Переориентация диатонической гаммы с одной тонике на другую, т. е. переход из одной тональности в другую в пределах той же самой композиции – называется тональной модуляцией. Тональная модуляция является одним из главных структурных компонентов музыки и одним из ключевых средств выразительности в европейской музыкальной культуре [5].

Как правило, расстояния между тональностями показываются с помощью квинтового круга (рис. 1). Переориентация тонального пространства приводит к замене определенного числа тонов. На рис. 2 показано, как переориентация с «до» мажор на соседний (отличающийся на 1 шаг по квинтовому кругу) «соль» мажор приводит к замене лишь 1 тона. Тогда как переориентация на «си» мажор (отличающийся на 5 ступеней по квинтовому кругу) ведет к замещению пяти тонов в начальной гамме. Чем дальше расстояние от начального тонального центра до конечного, тем больше замен среди тонов начальной гаммы (см. рис. 2).

Предыдущие исследования показали, что ладовое условие и расстояние модуляции музыкальных фрагментов влияют на характеристики ЭЭГ [6]. Эти изменения проявляются даже у детей в возрасте 30 месяцев [7]. На основании этих данных нами были выбраны 3 ступени переориентации тонального пространства (субдоминанта, до-

минанта, секста) для сравнения воздействия гармонических последовательностей и отрывков музыкальных произведений.



Рис. 1. Квинтовый круг. Показаны начальная тональность («до» мажор), близкая к ней модуляция («соль» мажор) и дальняя модуляции («си» мажор). Рисунок заимствован из книги [8]

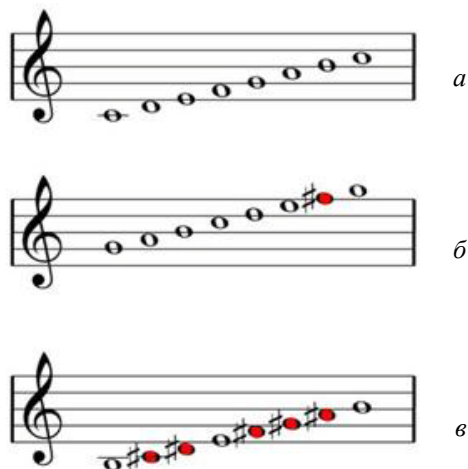


Рис. 2. Расстояние в тональном пространстве. Выделены ноты, заменяемые при переориентации тонального пространства по сравнению с начальной гаммой; а – начальная тональность «до» мажор (C), б – близкая к «до» мажор тональность «соль» мажор (G), в – дальняя к «до» мажор тональность «си» мажор (B). Рисунок заимствован из книги [8]

## Процедура эксперимента

В исследовании приняло участие 15 человек (5 мужчин и 10 женщин) в возрасте от 17 до 28 лет. Опыт игры на музыкальных инструментах и занятий вокалом имели 12 добровольцев (средняя продолжительность 4 года), ни один не являлся профессиональным музыкантом. Перед участием в эксперименте каждый испытуемый ознакомился и подписал форму добровольного информирован-

ного согласия на участие. Эксперимент был организован и проводился в соответствии с этическими нормами, установленными Хельсинской декларацией 1964 года.

Испытуемым предлагалось прослушать 2 серии стимулов: 24 гармонических последовательности и 24 отрывка из музыкальных произведений. Каждая серия включала в себя 3 тональные дистанции: ступень 5 (субдоминанта), ступень 7 (доминанта) и ступень 8 (малая секста), по 8 стимулов каждая. Все произведения были в мажорном ладу. Стимулы предъявлялись в случайном порядке.

Гармонические последовательности были специально написаны для этого эксперимента. Каждая музыкальная фраза состояла из 8 аккордов. Первые три – пять аккордов устанавливали начальную тональность, а следующие за ними переходные аккорды совершали модуляцию в заключительную тональность посредством обычной каденции доминанта – тоника. Музыкальные фразы были одинаковы по темпу, стилю, громкости, тембру и фактуре. Стилистическое единообразие предотвращало интеракцию между ладом и фактурой [9]. 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 была по продолжительности 11 секунд и включала небольшое замедление в конце для более естественного звучания. Последний аккорд продолжался 3 секунды, чтобы подчеркнуть заключительную тональность.

Музыкальные отрывки были взяты из классических произведений Моцарта, Хайдена, Шуберта и Бетховена продолжительностью 10–15 секунд. 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 электроэнцефалограф-анализатора ЭЭГА-21\26 «Энцефалан-131-03» компании Медиком-МТД (Таганрог, Россия). Схема монтажа отведений – «BaseMonopolar», частота дискретизации – 250 Гц, использовались следующие 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. Для спектрального анализа использовались данные ЭЭГ за 10 с до предъявления аудиофрагмента, 10 с во время предъявления аудиофрагмента и 10 с после предъявления аудиофрагмента. Анализ проводился в следующих частотных диапазонах: тета (4–8 Гц), альфа (8–13 Гц), бета-1 (13–21 Гц) и бета-2 (21–35 Гц). Дельта-диапазон

(0,5–4 Гц) не анализировался из-за сильной зашумленности. Для статистической обработки использовались средние по всем отведениям относительные значения мощностей, вычисляемые по формуле:

$$P_{\text{отн}}(\Delta f) = \frac{P_{\text{абс}}(\Delta f)}{P_{\text{абс}}} \cdot 100\%.$$

Здесь  $P_{\text{абс}}(\Delta f)$  – абсолютное значение мощности в частотном диапазоне  $\Delta f$ ;  $P_{\text{абс}}$  – суммарное абсолютное значение мощности во всех частотных диапазонах.

Регистрация ЭЭГ осуществлялась в положении сидя, на кресле с возможностью регулировки высоты спинки, подлокотников и высоты кресла относительно пола. Во время записи 10-секундного фона до стимула испытуемые находились в полной тишине и получали команду закрыть глаза, расслабиться. Прослушивание музыкальных фраз осуществлялось с помощью динамиков, испытуемому давалась инструкция осуществлять прослушивание с закрытыми глазами и не открывать их до команды экспериментатора. Во время 10-секундного фона после прослушивания испытуемые заполняли бланк анкеты семантического дифференциала (в данном исследовании он не рассматривается).

Статистическая обработка велась при помощи программ Microsoft Excel 2010 и Statistica 10. Вычислялся  $W$ -критерий Уилкоксона для зависимых выборок. После этого проводилась поправка на множественные сравнения с помощью метода Беньямини – Йекутили [10].

## Результаты и обсуждение

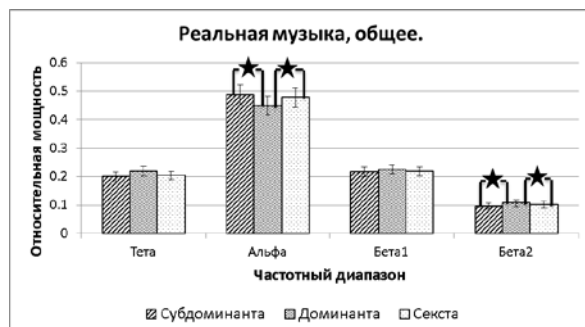
Прослушивание и гармонических последовательностей, и отрывков музыкальных произведений увеличивало мощность в альфа ( $p \leq 0,05$ ) и уменьшало в бета-2 ( $p \leq 0,01$ ) диапазонах по сравнению с 10-секундным фоном до прослушивания, что согласуется с предыдущими исследованиями о влиянии музыки на характеристики ЭЭГ [1–3]. Мы связываем это с синхронизацией корковых структур, что свидетельствует о снижении уровня напряжения и об общем расслаблении, что подтверждает благоприятный эффект при прослушивании музыки [3, 11].

При сравнении между собой гармонических последовательностей с переориентацией в субдоминанту, доминанту и сексту не было выявлено значимых различий.

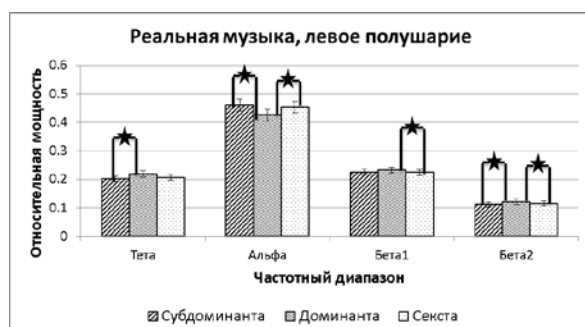
Прослушивание отрывков музыкальных произведений с переориентацией на доминанту приводило к меньшему увеличению мощности в альфа-диапазоне ( $p \leq 0,01$ ) по сравнению с субдоминантой и секстой, а также большее увеличение мощности в бета-2 диапазоне ( $p \leq 0,01$ ) по сравнению с субдоминантой (рис. 3).

В обоих полушариях мозга переориентация тонального пространства на доминанту при прослушивании отрывков музыкальных произведений достоверно различалась в тета ( $p \leq 0,01$ ), альфа ( $p \leq 0,01$ ) и бета-2-диапазонах ( $p \leq 0,01$ ) по срав-

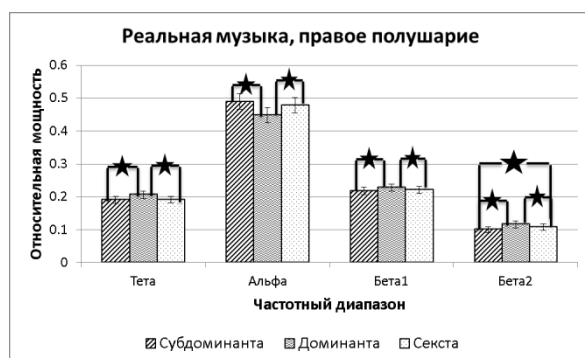
нению с субдоминантой, а так же в альфа и бета-1 ( $p \leq 0,01$ ) диапазонах по сравнению с секстой. И в правом и в левом полушариях прослушивание с переориентацией на доминанту имело меньший прирост мощности в альфа и больший в бета-1 диапазоне по сравнению с субдоминантой и секстой (рис. 4, 5). То, что доминанта оказывает достоверно отличное влияние на характеристики ЭЭГ, требует дополнительного исследования.



**Рис. 3.** Сравнение субдоминанты, доминанты и сексты в контексте прослушивания отрывков музыкальных произведений. Звездочкой отмечены достоверные различия ( $p \leq 0,05$ )



**Рис. 4.** Сравнение субдоминанты, доминанты и сексты в контексте прослушивания отрывков музыкальных произведений в левом полушарии. Звездочкой отмечены достоверные различия ( $p \leq 0,05$ )



**Рис. 5.** Сравнение субдоминанты, доминанты и сексты в контексте прослушивания отрывков музыкальных произведений в правом полушарии. Звездочкой отмечены достоверные различия ( $p \leq 0,05$ )

Различий в характеристиках ЭЭГ между прослушиванием отрывков музыкальных произведений и гармонических последовательностей (сравнивались попарно по ступеням переориентации) выявлено не было. Это может говорить о том, что тональная модуляция в гармонических последовательностях (где остальные параметры музыкаль-

ного произведения сведены к минимуму) и в отрывках музыкальных произведений имеет одинаковое воздействие на характеристики ЭЭГ. Это дает возможность предполагать, что модуляция тонального пространства является одним из существенных факторов влияния музыкальных произведений на человека.

В фоне после прослушивания стимулов отмечалось снижение мощности в альфа- и увеличение в тета-диапазонах по сравнению с прослушиванием стимула. Для отрывков музыкальных произведений отмечался достоверно больший уровень мощности в альфа-диапазоне и достоверно меньший уровень в тета-диапазоне по сравнению с гармоническими последовательностями. Таким образом, несмотря на то что различий между гармоническими последовательностями и отрывками музыкальных произведений при прослушивании не было, тем не менее эффект, который оказали фрагменты музыкальных произведения, приводил к меньшему снижению в альфа-ритме после прослушивания стимулов.

В 10-секундном периоде после предъявления стимула между отрывками музыкальных произведений и гармоническими последовательностями (сравнивались попарно по ступеням переориентации) достоверные различия были получены в тета ( $p \leq 0,01$ ) и альфа ( $p \leq 0,01$ ) диапазонах во всех 3 ступенях тональной модуляции. После прослушивания отрывков музыкальных произведений мощность в альфа-диапазоне была выше, а в тета-диапазоне ниже по сравнению с гармоническими последовательностями. Таким образом, несмотря на то что различий между гармоническими последовательностями и отрывками музыкальных произведений при прослушивании не было, эффект, который оказывали произведения (увеличение мощности альфа диапазона и уменьшения мощности бета-2 диапазона), приводил к меньшему снижению мощности альфа-диапазона после прослушивания. Это может говорить о том, что на результат прослушивания фрагментов музыкальных произведений оказывали эффект другие компоненты музыки.

## Выводы

Было показано, что тональная модуляция в гармонических последовательностях и в отрывках музыкальных произведений оказывает одинаковый эффект на характеристики ЭЭГ. Это дает возможность предполагать, что тональная модуляция является одним из факторов воздействия музыки на функциональное состояние человека.

Сравнение 10-секундного периода после прослушивания показало, что эффект от прослушивания музыкальных произведений приводил к меньшему снижению мощности в альфа-диапазоне после прослушивания и меньшему повышению мощности в тета-диапазоне. Исходя из этих соображений, можно сделать вывод, что в музыкальных произведениях по сравнению с гармоническими последовательностями (где остальные па-

раметры музыкального произведения сведены к минимуму) существуют дополнительные факторы воздействия музыки на функциональное состояние человека.

Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ № 14-36-01024.

### Литература

1. Федотчев А.И., Радченко Г.С. Музыкальная терапия и «музыка мозга»: состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиологических наук. 2013. Т. 44, вып. 4. С. 35–50.
2. Bernardi L., Porta C., & Sleight L. Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non-musicians: The importance of silence // Heart. 2006. V. 92 (4). P. 445–452.
3. Guhn M., Hamm A., Zentner M. Physiological and musicoacoustic correlates of the chill response // Music Perception. 2007. V. 24(5). P. 473–484.
4. Vanderark S.D., Ely D. Cortisol, Biochemical, and Galvanic Skin Responses to Musical Stimuli of Different Preference Values by College Students in Biology and Music // Perceptual and Motor Skills. 1993. V. 77(1). P. 227–234.
5. Deutsch D. The Psychology of Music. Third Edition. Academic Press, 2013. P. 786.
6. Радченко Г.С. и др. Влияние характеристик тональной модуляции музыкальных фрагментов на показатели ЭЭГ // XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2015»: Сборник научных трудов. В 3 ч. Ч. 1. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. 244 с.
7. Jentschke S., Friederici A.D., Koelsch S. Neural correlates of music-syntactic processing in two-year old children // Developmental Cognitive Neuroscience. 2014. V. 9. P. 200–208.
8. Korsakova-Kreyn M.N. The universe of music. Charleston, SC : CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010. P. 76.
9. 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. 2014. V. 24(1). P. 4–20.
10. Benjamini Y., Yekutieli D. The control of the false discovery rate in multiple testing under dependency // The Annals of Statistics. 2001. V. 29(4). P. 1165–1188.
11. Lin V.P. et al. Revealing spatio-spectral electroencephalographic dynamics of musical mode and tempo perception by independent component analysis // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2014. V. 11(18).