

ЯЗЫК МУЗЫКИ И ЕГО ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ (ОБЗОР)

DOI: 10.17691/stm2019.11.1.04

УДК 615.851.82:78

Поступила 22.10.2018 г.



M. Korsakova-Kreyn, PhD, Associate Professor, Psychology

The Touro College and University System, Lander College for Women, 227 West 60th St.,
New York, NY 10023, USA

Использование музыки в реабилитационной медицине требует понимания механизмов музыкального воздействия. В статье рассматривается происхождение различий в характере основных мелодических элементов музыки, обсуждаются особенности тонального пространства и подчеркивается важность прекогнитивного аспекта в восприятии музыки. Музыку называют «языком эмоций». Так как работа высших уровней человеческого сознания неотделима от эмоций, изучение механизмов эмоциональной обработки является одной из наиболее важных областей когнитивных наук. Исследования восприятия музыки помогают осветить значимые аспекты человеческого сознания и способствуют совершенствованию методов применения музыкальной терапии.

Ключевые слова: нейрофизиологические корреляты восприятия музыки; механизмы музыкального восприятия; музыкальная терапия.

Как цитировать: Korsakova-Kreyn M. Language of music and its psychophysical foundations (review). *Sovremennyye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 40–45, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.04>

English

Language of Music and Its Psychophysical Foundations (Review)

M. Korsakova-Kreyn, PhD, Associate Professor, Psychology

The Touro College and University System, Lander College for Women, 227 West 60th St., New York,
NY 10023, USA

Application of music in rehabilitation medicine requires an understanding of the mechanisms of music perception. This article discusses differences in character of the basic melodic elements and addresses some of the specifics of tonal space. Colloquially, music is called the language of emotion. Bearing in mind that high-level cognitive functioning in humans is inseparable from affective consciousness, investigating the mechanisms of emotional processing belongs to an important area of cognitive sciences. Studying music perception can help to advance methods of music therapy and to elucidate major aspects of human consciousness.

Key words: neurophysiological correlates of musical perception; mechanisms of music perception; music therapy.

Музыка — это лепка невидимого.

Леонардо да Винчи

Введение

Согласно томографическим исследованиям, звуки музыки способны активизировать систему вознаграждения мозга [1, 2]. Музыка может вызывать мурашки по коже (пиллоэрекцию) [3, 4] и влиять на психофизиологическое состояние слушателей, изменяя нейрохимию [5], ритм сердца, частоту дыхания и электропроводимость кожи [6–10]. Если прагматичные эмоции [11,

12] происходят в ответ на конкретные знаки и образы и служат для выживания, эмоциональную отзывчивость на музыку объяснить сложнее, поскольку в музыке нет ни когнитивных констант [13] типа слов и видимых образов, ни соматосенсорных ощущений, таких как тепло от горячего хлеба или свежесть и влага дождя.

Способность музыки влиять на чувства и физиологию слушателей и пробуждать сложные эмоции [14] без участия слов и узнаваемых видимых образов означает, что музыка использует некий очень простой и в то же время мощный механизм, который воздействует на человеческий разум более-менее прямым и несложным путем.

Для контактов: Marina Korsakova-Kreyn, e-mail: mnkors@gmail.com

Психофизика консонансов и диссонансов и принцип наименьших усилий

Основные элементы музыки — благозвучные и диссонантные звуко сочетания — производят различающиеся рисунки активизации мозга у новорожденных [15]. У малышей в возрасте одного месяца изменяется сердечный ритм на те мелодии, которые они слышали до рождения, во время последнего месяца нормальной беременности их мам [16]. Исследования двух-, четырехмесячных детей показывают, что они смотрят с интересом на источник благозвучных консонансов и отворачиваются, когда слышат диссонансы [17], т.е. понимание характера основных мелодических элементов — понимание основного строительного материала музыки — дано человеческим существам с младенчества. К восьми годам у детей развивается интуиция на язык тональной гармонии [18], что делает доступным навигацию в тональном пространстве музыки. Это пространство объясняется короткой и элегантной формулой гармонического движения: тоника (I) — субдоминанта (IV) — доминанта (V) — тоника (I), в которой римские цифры обозначают ступени диатонической гаммы, а слова определяют три основные функциональные области в тональном пространстве. Изучение реакций студентов университета на специфические особенности музыкального пространства, такие как тональная модуляция и музыкальные стили, показывает, что слушатели без формального музыкального образования обладают тонкой чуткостью к сложным музыкальным процессам [19]. Понимание сути содержания музыки не требует специальной музыкальной подготовки [20].

С точки зрения нейронауки восприятие музыки принадлежит аффективному сознанию [21, 22]. Согласно модели триединого мозга [23], процессы прелингвистического и эмоционального осознания осуществляются в лимбической системе [24]. Исследования процессов эмоциональной обработки в музыке сфокусированы в основном на тональных отношениях [25, 26], а именно на таких аспектах, как мажорный и минорный лады [19, 27–37]. Тональные отношения являют собой главный морфологический принцип той привычной всем музыки, которую можно напевать и под которую можно танцевать. В музыковедении тональные отношения объясняются с точки зрения иерархии воспринимаемого тонального напряжения и тональной неустойчивости [38–41]. Интуитивное следование человеческого разума от тональной неустойчивости к устойчивости является источником ощущения движения в музыке [39, 42].

Понятие тональной неустойчивости используется в детских музыкальных школах для объяснения основ теории музыки и таких структурных явлений, как музыкальная фразировка. Именно понятие тональной неустойчивости лежит в основе трудов о музыкальном синтаксисе (функциональной гармонии) [25, 41] и об анализе музыкальных форм [40, 43, 44]. Поскольку воспринимаемая тональная неустойчивость генерируется иерархией тонального притяжения, т.е. гради-

ентом притяжения, тональное пространство получило определение «феноменальная гравитация» [45].

Одно из самых интересных направлений в изучении восприятия музыки затрагивает связь между воспринимаемым тональным напряжением и реальным физическим напряжением [46–48]. Эта связь позволяет отнести восприятие музыки к области воплощенного (телесного) сознания [42, 49, 50]. С другой стороны, открытие градиента перцептивного комфорта для музыкальных звуко сочетаний [51, 52] дало возможность объяснить разницу между характером звучания напряженных диссонансов и благозвучных консонансов с точки зрения принципа наименьших усилий [53]. А именно, поскольку консонантные сочетания звуков обладают общей важной спектральной информацией [54], это должно облегчать нейронную обработку консонансов по сравнению с напряженно-звучающими диссонансами. Речь здесь идет о генерируемых вибрацией обертоновых сериях [55].

Спектральная общность информации особенно наглядна для пифагорейских интервалов октавы, квинты и кварты; все три известны со времен античности как консонантные созвучия. У каждого пифагорейского интервала второй звук дублирует один из трех первоначальных (сильных) обертонов первого звука (учитывая октавную эквивалентность). Еще более впечатляющей является психофизика мажорного трезвучия — благозвучного и «веселого», — тона которого представляют собой комбинацию из основного тона и его первых четырех обертонов (это означает, что обертоновая серия любого натурально произведенного музыкального звука начинается с мажорного трезвучия). Судя по всему, в отношении мелодических элементов мы имеем дело с «законом лениности»: когда обработка сложного сигнала облегчается благодаря дублированию «громкой» информации в обертоновых сериях составляющих звуков, это транслируется в приятность звучания. Такое объяснение гармонирует с известным выражением Лейбница, в котором он назвал музыку «подсознательным вычислением души, не знающей, что она занята вычислением». Таким образом, восприятие мелодических элементов не требует интеллектуальных усилий, но опирается на «скрытое измерение обертонов».

Открытие связи между воспринимаемым тональным напряжением и реальным физическим напряжением [47], как и открытие градиента перцептивного комфорта для музыкальных звуко сочетаний [51, 52] подчеркивают важность прекогнитивного аспекта в восприятии музыки. Эта особенность восприятия «строительного материала» музыки объясняет ее широкую доступность для слушателей, включая пациентов с болезнью Альцгеймера [56] и подростков с аутизмом [57].

Архаичная модель восприятия музыки

Связь между воспринимаемым тональным напряжением и реальным физическим напряжением означает,

что тонально-временные паттерны музыки передают логику эмоций [58] посредством наиболее примитивных реакций, присущих всему живому, — физического напряжения и расслабления. В контексте аффективной нейробиологии [22] архаичная модель восприятия музыки [19] предполагает, что эмоции в ней тесно связаны с висцерально-моторными реакциями на напряженные и ненапряженные мелодические элементы, а именно, что интеграция тонально-временных отношений в музыке имитирует динамику интеграции сомато- и висцерально-моторной информации, присущей формированию обычных, немusикальных эмоций, и что эта «внутренняя» сомато- и висцерально-моторная информация является неотъемлемой частью формирования музыкальных структур, передающих образы психологического времени в музыке.

Когда мы сравниваем механизмы передачи информации в музыке с передачей информации в речи, поражает несхожесть этих двух способов общения. В музыке нет ничего подобного словам и частям речи. Вместо этого восприятие музыки опирается на интуитивное ощущение уровней тональной неустойчивости и напряженности. И хотя у музыки и речи есть общий доисторический корень — вокализация, — эволюционная бифуркация ее на речь и музыку привела к радикально разным принципам передачи информации. Если та ветвь вокализации, что развилась в речь, опирается на семантическую определенность слов (которые могут быть с большой точностью переведены на другие языки), то музыка имеет дело с эмоциональной компонентой вокализации. Единственная схожесть между речью и музыкой — это интонирование речи, так называемая мелодия речи, заостряющая значение слов. Слова способны описать погоду, возраст, пол и профессиональную подготовку данного человека. Музыка совершенно беспомощна в своей неопределенности там, где дело касается фактов, но она способна с исключительной точностью отобразить и передать эмоциональные состояния. Когда мы видим людей, говорящих о чем-то со страстью, это может нас тоже разволновать. В то же время, чтобы понять речи, к примеру, Фауста и Отелло в оригинале, мы должны знать набор определенных слов (немецких и английских соответственно), а также синтаксические правила пользования этими словами. Что касается музыки, она не требует перевода благодаря интуитивно ощущаемому градиенту тонального притяжения, лежащему в основе музыкальной морфологии.

Иерархия дискретных уровней тональной неустойчивости образует систему отсчета, позволяющую считывание мелодических паттернов и восприятие музыкальных структур. В европейской традиции, доминирующей в сегодняшнем мире, музыкальная система отсчета представляет собой диатоническую гамму, состоящую из семи тонов. Тона отличаются по звуковысотности, но это уступает в важности различиям в уровне притяжения тонов гаммы к тональному центру — тонике. В процессе слушания музыки

каждая нота и каждое музыкальное звуко сочетание проверяются на статус в тональном пространстве, которое генерируется уровнями воспринимаемого тонального притяжения. Состояние, при котором такая проверка на тональный статус недоступна, называется амьюзией [59]. Хотя у неврологически здоровых амьюзиков наблюдается нормальное понимание речи, неспособность к созданию мысленной системы отсчета не позволяет им улавливать музыкальные структуры в тональном пространстве.

Тональное пространство линейно в смысле распределения частоты звука, но оно нелинейно в смысле тонального притяжения [60]. Более того, тональная материя организована циклично [61, 62], так что те же 12 полутонов хроматической гаммы повторяются в разных регистрах, создавая звуковой диапазон, например диапазон из 88 звуков рояля. Экономия музыкальной материи — 7 тонов диатонической гаммы плюс 5 хроматических тонов — является еще одним фактором, объясняющим широкую доступность восприятия музыки.

Терапевтические свойства музыки

Способность музыки активизировать систему вознаграждения мозга и пробуждать эстетические эмоции говорит о ее терапевтическом потенциале [63]. Например, музыкальная терапия для детей с аутизмом помогает развивать речь [64] и навыки общения [65]. Применение мелодической интонационной терапии (MIT) способствует восстановлению речи у пациентов с афазией Брока [66].

Один из самых очевидных и энигматичных эффектов музыкальной терапии наблюдается у пациентов с болезнью Паркинсона, когда звуки ритмической музыки внезапно улучшают двигательные функции больных, как бы мгновенно «настраивая» работу сложных нейробиологических механизмов движения пострадавших в результате дефицита дофаминергических нейронов [67, 68]. Более того, занятия по методу ритмической аудиостимуляции (RAS) приводят к устойчивому улучшению походки при болезни Паркинсона [69–71].

Для пациентов с инсультом мозга слушание музыки ведет к улучшению как концентрации внимания, так и лексической памяти, что происходит наряду с тонкой структурной реорганизацией во фронтально-лимбической области мозга пациентов [72].

Регулярные занятия игрой на музыкальном инструменте производят нейропластичные изменения белого и серого вещества у детей и взрослых [63, 73–75]. У детей нейропластичные изменения сопровождаются улучшением выполнения задач на запоминание [76, 77], коррелирующих с коэффициентом интеллекта (IQ). У лиц пожилого возраста обучение игре на музыкальном инструменте повышает уровень зрительно-моторного внимания, улучшает двигательные функции и положительно влияет на ощущение качества жизни [78, 79]. Эти положительные изменения

позволяют отнести занятия музыкой к когнитивной терапии.

Закономерно, что в последнее время одним из наиболее перспективных направлений в создании реабилитационных систем с резонансным нейробиоуправлением от естественных осцилляторов пациента становится использование музыки или музыкаподобных сигналов для контролируемой коррекции функциональных состояний [80–85].

Заключение

Интуитивно воспринимаемые морфологические особенности языка музыки делают понимание ее содержания повсеместно доступным, не требуя формального обучения. Концепция главного морфологического принципа тональной музыки — ощущаемого тонального напряжения — принадлежит изначально теории музыки, и именно союз музыковедения и нейропсихологии позволяет изучать поведенческие и нейробиологические корреляты эмоциональной отзывчивости на музыку. Мелодическая материя пространства музыки отличается экономией и простотой восприятия ее основных элементов. Организация этих элементов в тонально-временные структуры музыкального искусства способна создавать сложные образы психологического состояния — виртуальную действительность эмоций. Музыка обладает терапевтическим потенциалом, природа которого все еще не всегда понятна. Активные занятия музыкой и даже слушание музыкальных произведений способны произвести нейропластичные изменения, сопровождающиеся улучшением когнитивных функций. Эти терапевтические эффекты позволяют отнести музыку к инструментам когнитивной терапии.

Финансирование исследования и конфликт интересов. Исследование не финансировалось какими-либо источниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

Литература/References

1. Blood A.J., Zatorre R.J. Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2001; 98(20): 11818–11823, <https://doi.org/10.1073/pnas.191355898>.
2. Berridge K.C., Kringelbach M.L. Pleasure systems in the brain. *Neuron* 2015; 86(3): 646–664, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.02.018>.
3. Panksepp J., Bernatzky G. Emotional sounds and the brain: the neuro-affective foundations of musical appreciation. *Behav Processes* 2002; 60(2): 133–155, [https://doi.org/10.1016/s0376-6357\(02\)00080-3](https://doi.org/10.1016/s0376-6357(02)00080-3).
4. Sachs M.E., Ellis R.J., Schlaug G., Loui P. Brain connectivity reflects human aesthetic responses to music. *Soc Cogn Affect Neurosci* 2016; 11(6): 884–891, <https://doi.org/10.1093/scan/nsw009>.
5. Chanda M.L., Levitin D.J. The neurochemistry of music. *Trends Cogn Sci* 2013; 17(4): 179–93, <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.02.007>.
6. Bernardi L., Porta C., Sleight P. Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non-musicians: the importance of silence. *Heart* 2005; 92(4): 445–452, <https://doi.org/10.1136/hrt.2005.064600>.
7. Koelsch S., Siebel W.A. Towards a neural basis of music perception. *Trends Cogn Sci* 2005; 9(12): 578–584, <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.10.001>.
8. Iwanaga M., Moroki Y. Subjective and physiological responses to music stimuli controlled over activity and preference. *J Music Ther* 1999; 36(1): 26–38, <https://doi.org/10.1093/jmt/36.1.26>.
9. Krumhansl C.L. An exploratory study of musical emotions and psychophysiology. *Can J Exp Psychol* 1997; 51(4): 336–353, <https://doi.org/10.1037/1196-1961.51.4.336>.
10. Trappe H.-J. Music and medicine: the effects of music on the human being. *Applied Cardiopulmonary Pathophysiology* 2012; 16: 133–142.
11. Cannon W.B. *Bodily changes in pain, hunger, fear and rage, an account of recent researches into the function of emotional excitement*. New York and London: D. Appleton and Co.; 1915.
12. Ekman P., Cordaro D. What is meant by calling emotions basic. *Emotion Review* 2011; 3(4): 364–370, <https://doi.org/10.1177/1754073911410740>.
13. Солнцев В.М. К вопросу о семантике или языковом значении (вместо предисловия). В кн.: Проблемы семантики. М: Наука; 1974. Solntsev V.M. K voprosu o semantike ili yazykovom znachenii (vmesto predisloviya). V kn.: *Problemy semantiki* [To the question of semantics or linguistic value (in lieu of a preface). In: Problems of semantics]. Moscow: Nauka; 1974.
14. *Handbook of music and emotion: theory, research, applications*. Juslin P.N., Sloboda J.A. (editors). New York: Oxford University Press; 2010.
15. Virtala P., Huutilainen M., Partanen E., Fellman V., Tervaniemi M. Newborn infants' auditory system is sensitive to Western music chord categories. *Front Psychol* 2013; 4: 492, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00492>.
16. Granier-Deferre C., Bassereau S., Ribeiro A., Jacquet A.-Y., DeCasper A.J. A melodic contour repeatedly experienced by human near-term fetuses elicits a profound cardiac reaction one month after birth. *PLoS One* 2011; 6(2): e17304, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017304>.
17. Trainor L.J. Are there critical periods for musical development? *Dev Psychobiol* 2004; 46: 262–278.
18. Costa-Giomi E. Young children's harmonic perception. *Ann N Y Acad Sci* 2003; 999: 477–484.
19. Korsakova-Kreyn M., 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; 24(1): 4–20, <https://doi.org/10.1037/pmu0000029>.
20. Bigand E., Poulin-Charonnat B. Are we “experienced listeners”? A review of the musical capacities that do not depend on formal musical training. *Cognition* 2006; 100(1): 100–130, <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.11.007>.
21. Panksepp J. *Affective neuroscience: the foundations of human and animal emotions*. New York: Oxford University Press; 1998.
22. Panksepp J. Affective consciousness: core emotional feelings in animals and humans. *Conscious Cogn* 2005; 14(1): 30–80, <https://doi.org/10.1016/j.concog.2004.10.004>.

23. MacLean P.D. *The triune brain in evolution: role in paleocerebral functions*. New York: Plenum Press; 1990.
24. MacLean P.D. Some psychiatric implications of physiological studies on frontotemporal portion of limbic system (visceral brain). *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1952; 4(4): 407–418, [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(52\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(52)90073-4).
25. Lerdahl F. *Tonal pitch space*. New York: Oxford University Press; 2001.
26. Lerdahl F., Krumhansl C.L. Modeling tonal tension. *Music Perception: an Interdisciplinary Journal* 2007; 24(4): 329–366, <https://doi.org/10.1525/mp.2007.24.4.329>.
27. Gagnon L., Peretz I. Mode and tempo relative contributions to “happy-sad” judgements in equitone melodies. *Cogn Emot* 2003; 17(1): 25–40, <https://doi.org/10.1080/02699930302279>.
28. Hevner K. Experimental studies of the elements of expression in music. *Am J Psychol* 1936; 48(2): 246, <https://doi.org/10.2307/1415746>.
29. Kastner M.P., Crowder R.G. Perception of the major/minor distinction: IV. Emotional connotations in young children. *Music Perception: an Interdisciplinary Journal* 1990; 8(2): 189–201, <https://doi.org/10.2307/40285496>.
30. Trochidis K., Bigand E. Investigation of the effect of mode and tempo on emotional responses to music using EEG power asymmetry. *J Psychophysiol* 2013; 27(3): 142–148, <https://doi.org/10.1027/0269-8803/a000099>.
31. Virtala P., Tervaniemi M. Neurocognition of major-minor and consonance-dissonance. *Music Perception: an Interdisciplinary Journal* 2017; 34(4): 387–404, <https://doi.org/10.1525/mp.2017.34.4.387>.
32. Webster G.D., Weir C.G. Emotional responses to music: interactive effects of mode, texture, and tempo. *Motivation and Emotion* 2005; 29(1): 19–39, <https://doi.org/10.1007/s11031-005-4414-0>.
33. Firmino E.A., Bueno J.L.O., Bigand E. Effects of tonal modulation on subjective time estimation. *Music Perception* 2009; 26(3): 205–209.
34. Koelsch S., Gunter T., Schröger E., Friederici A.D. Processing tonal modulations: an ERP study. *J Cogn Neurosci* 2003; 15(8): 1149–1159, <https://doi.org/10.1162/089892903322598111>.
35. Radchenko G.S., Parin S.B., Poleyeva S.A., Korsakova-Kreyin M.N., Fedotchev A.I. EEG correlates of perception of tonal modulation in musical fragments. *Int J Psychophysiol* 2014; 94(2): 192, <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.08.798>.
36. Thompson W.F., Cuddy L.L. Music performance and the perception of key. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1997; 23(1): 116–35, <https://doi.org/10.1037/0096-1523.23.1.116>.
37. Tillmann B., Bharucha J.J., Bigand E. Implicit learning of tonality: a self-organizing approach. *Psychol Rev* 2000; 107(4): 885–913, <https://doi.org/10.1037/0033-295x.107.4.885>.
38. Fétis F.-J. *Complete treatise on the theory and practice of harmony*. Translated by Landey P.M. Hillsdale: Pendragon Press; 2008.
39. Meyer L.B. *Emotion and meaning in music*. Chicago, IL: University of Chicago Press; 1956.
40. Rosen C. *Sonata forms*. New York: W.W. Norton; 1988.
41. Schoenberg A. *Structural functions of harmony*. New York: W.W. Norton; 1969.
42. Korsakova-Kreyin M. Two-level model of embodied cognition in music. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain* 2018; 28(4): 240–259, <https://doi.org/10.1037/pmu0000228>.
43. Hepokoski J., Darcy W. *Elements of sonata theory norms, types, and deformations in the late-eighteenth-century sonata*. New York: Oxford University Press; 2006.
44. Способин И.В. Музыкальная форма. М: Музыка; 1984. Sposobin I.V. *Muzikal'naya forma* [Musical form]. Moscow: Muzyka; 1984.
45. Scruton R. *The aesthetics of music*. New York: Oxford University Press; 1997.
46. Nielsen F.V. *Oplevelse af musikalsk spænding* [The experience of musical tension]. Copenhagen: Akademisk Forlag; 1983.
47. Madsen C.K., Fredrickson W.E. The experience of musical tension: a replication of Nielsen's research using the continuous response digital interface. *J Music Ther* 1993; 30(1): 46–63, <https://doi.org/10.1093/jmt/30.1.46>.
48. Williams L.R., Fredrickson W.E., Atkinson S. Focus of attention to melody or harmony and perception of music tension: an exploratory study. *International Journal of Music Education* 2011; 29(1): 72–81, <https://doi.org/10.1177/0255761410372725>.
49. Damasio A. *The feeling of what happens: body and emotion in the making of consciousness*. London: Heinemann; 1999.
50. Damasio A. *Self comes to mind: constructing the conscious brain*. New York: Pantheon Books; 2010.
51. Bidelman G.M., Krishnan A. Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem. *J Neurosci* 2009; 29(42): 13165–13171, <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3900-09.2009>.
52. Bidelman G.M., Krishnan A. Brainstem correlates of behavioral and compositional preferences of musical harmony. *NeuroReport* 2011; 22(5): 212–226, <https://doi.org/10.1097/wnr.0b013e328344a689>.
53. Ferrero G. L'inertie mentale et la loi du moindre effort [Mental inertia and the law of least effort]. *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger* 1894; 37: 169–182.
54. Bowling D.L., Purves D. A biological rationale for musical consonance. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2015; 112(36): 11155–11160, <https://doi.org/10.1073/pnas.1505768112>.
55. Helmholtz H.L.F. *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. Translated by Ellis A.J. UK: Cambridge University Press; 2009, <https://doi.org/10.1017/cbo9780511701801>.
56. Dassa A., Amir D. The role of singing familiar songs in encouraging conversation among people with middle to late stage Alzheimer's disease. *J Music Ther* 2014; 51(2): 131–153, <https://doi.org/10.1093/jmt/thu007>.
57. Quintin E.-M., Bhatara A., Poissant H., Fombonne E., Levitin D.J. Emotion perception in music in high-functioning adolescents with autism spectrum disorders. *J Autism Dev Disord* 2010; 41(9): 1240–1255, <https://doi.org/10.1007/s10803-010-1146-0>.
58. Langer S. *Philosophy in a new key. A study in the symbolism of reason, rite, and art*. Cambridge: Harvard University Press; 1942.
59. Peretz I., Vuvan D.T. Prevalence of congenital amusia. *Eur J Hum Genet* 2017; 25(5): 625–830, <https://doi.org/10.1038/ejhg.2017.15>.
60. Krumhansl C.L., Kessler E.J. Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in a spatial representation of musical keys. *Psychol Rev* 1982; 89(4): 334–368, <https://doi.org/10.1037/0033-295x.89.4.334>.
61. Chew E. *Mathematical and computational modeling of tonality: theory and applications*. International Series in

Operations Research & Management Science. Springer US; 2014, <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9475-1>.

62. Purwins H., Blankertz B., Obermayer K. Toroidal models in tonal theory and pitch-class analysis. *Computing in Musicology* 2007; 15: 73–98.

63. Altenmüller E., Schlaug G. Apollo's gift: new aspects of neurologic music therapy. *Prog Brain Res* 2015; 217: 237–252, <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2014.11.029>.

64. Wan C.Y., Demaine K., Zipse L., Norton A., Schlaug G. From music making to speaking: engaging the mirror neuron system in autism. *Brain Res Bull* 2010; 82(3–4): 161–168, <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2010.04.010>.

65. Kim J., Wigram T., Gold C. Emotional, motivational and interpersonal responsiveness of children with autism in improvisational music therapy. *Autism* 2009; 13(4): 389–409, <https://doi.org/10.1177/1362361309105660>.

66. Schlaug G., Marchina S., Norton A. Evidence for plasticity in white-matter tracts of patients with chronic Broca's aphasia undergoing intense intonation-based speech therapy. *Ann N Y Acad Sci* 2009; 1169(1): 385–394, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04587.x>.

67. Parker N.F., Cameron C.M., Taliaferro J.P., Lee J., Choi J.Y., Davidson T.J., Daw N.D., Witten I.B. Reward and choice encoding in terminals of midbrain dopamine neurons depends on striatal target. *Nat Neurosci* 2016; 19(6): 845–854, <https://doi.org/10.1038/nn.4287>.

68. Xu Z., Chu X., Jiang H., Schilling H., Chen S., Feng J. Induced dopaminergic neurons: a new promise for Parkinson's disease. *Redox Biol* 2017; 11: 606–612, <https://doi.org/10.1016/j.redox.2017.01.009>.

69. Ashoori A., Eagleman D.M., Jankovic J. Effects of auditory rhythm and music on gait disturbances in Parkinson's disease. *Front Neurol* 2015; 6: 234, <https://doi.org/10.3389/fneur.2015.00234>.

70. Bukowska A.A., Krężalek P., Mirek E., Bujas P., Marchewka A. Neurologic music therapy training for mobility and stability rehabilitation with Parkinson's disease — a pilot study. *Front Hum Neurosci* 2016; 9: 710, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00710>.

71. Pau M., Corona F., Pili R., Casula C., Sors F., Agostini T., Cossu G., Guicciardi M., Murgia M. Effects of physical rehabilitation integrated with rhythmic auditory stimulation on spatio-temporal and kinematic parameters of gait in Parkinson's disease. *Front Neurol* 2016; 7: 126, <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00126>.

72. Särkämö T., Tervaniemi M., Laitinen S., Forsblom A., Soinila S., Mikkonen M., Autti T., Silvennoinen H.M., Erkkilä J., Laine M., Peretz I., Hietanen M. Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain* 2008; 131(3): 866–876, <https://doi.org/10.1093/brain/awn013>.

73. Gaser C., Schlaug G. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *J Neurosci* 2003; 23(27): 9240–9245.

74. Hyde K.L., Lerch J., Norton A., Forgeard M., Winner E., Evans A.C., Schlaug G. Musical training shapes structural brain development. *J Neurosci* 2009; 29(10): 3019–3025, <https://doi.org/10.1523/jneurosci.5118-08.2009>.

75. Wan C.Y., Schlaug G. Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *Neuroscientist* 2010; 16(5): 566–577, <https://doi.org/10.1177/1073858410377805>.

76. Schellenberg E.G. Music lessons enhance IQ.

Psychological Science 2004; 15(8): 511–514, <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00711.x>.

77. Forgeard M., Winner E., Norton A., Schlaug G. Practicing a musical instrument in childhood is associated with enhanced verbal ability and nonverbal reasoning. *PLoS One* 2008; 3(10): e3566, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003566>.

78. Bugos J.A., Perlstein W.M., McCrae C.S., Brophy T.S., Bedenbaugh P.H. Individualized piano instruction enhances executive functioning and working memory in older adults. *Aging Ment Health* 2007; 11(4): 464–471, <https://doi.org/10.1080/13607860601086504>.

79. Seinfeld S., Figueroa H., Ortiz-Gil J., Sanchez-Vives M.V. Effects of music learning and piano practice on cognitive function, mood and quality of life in older adults. *Front Psychol* 2013; 4: 810, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00810>.

80. Fedotchev A.I., Oh S.J., Semikin G.I. Combination of neurofeedback technique with music therapy for effective correction of stress-induced disorders. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2014; 6(3): 60–63.

81. Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А., Радченко Г.С. Эффекты музыкально-акустических воздействий, управляемых ЭЭГ осцилляторами субъекта. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова* 2015; 101(8): 970–977. Fedotchev A.I., Bondar' A.T., Bakhchina A.V., Parin S.B., Polevaya S.A., Radchenko G.S. Effects of music-acoustic signals, online controlled by EEG oscillators of the subject. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I.M. Sechenova* 2015; 101(8): 970–977.

82. Fedotchev A.I., Bondar A.T., Bakhchina A.V., Grigorieva V.N., Katayev A.A., Parin S.B., Radchenko G.S., Polevaya S.A. Transformation of patient's EEG oscillators into music-like signals for correction of stress-induced functional states. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2016; 8(1): 93–98, <https://doi.org/10.17691/stm2016.8.1.12>.

83. 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; 47(1): 69–79. Fedotchev A.I., Bondar' A.T., Bakhchina A.V., Parin S.B., Polevaya S.A., Radchenko G.S. Music-acoustic signals controlled by subject's brain potentials in the correction of unfavorable functional states. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* 2016; 47(1): 69–79.

84. Федотчев А.И., Журавлев Г.И., Ексина К.И., Силантьева О.М., Полевая С.А. Оценка эффективности музыкального ЭЭГ нейроинтерфейса с дополнительным контуром управления от сердечного ритма. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова* 2018; 104(1–12): 122–128. Fedotchev A.I., Zhuravlev G.I., Eksina K.I., Silantjeva O.M., Polevaya S.A. Evaluation of efficiency of musical EEG neurointerface with additional control contour from heart rhythm. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I.M. Sechenova* 2018; 104(1–12): 122–128.

85. Земляная А.А., Радченко Г.С., Федотчев А.И. Управляемые биопотенциалами мозга пациента музыкально-терапевтические воздействия в коррекции функциональных расстройств. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова* 2018; 118(3): 103. Zemlyanaya A.A., Radchenko G.S., Fedotchev A.I. Music therapy procedures controlled by the brain potentials in treatment of functional disorders. *Zhurnal nevrologii i psichiatrii imeni S.S. Korsakova* 2018; 118(3): 103, <https://doi.org/10.17116/jnevro201811831103-106>.