

МУЗЫКА И МОЗГ

И. А. Евин

Музыка — неотъемлемая часть человеческой цивилизации. В истории человечества невозможно указать географическое место или временной интервал, где бы или когда бы отсутствовала музыкальная культура. Недавние археологические исследования в Словении и Франции, где были найдены флейты из костей животных, изготовленные более 53000 лет назад, заставляют сделать вывод, что музыка предшествовала сельскохозяйственной культуре и, возможно, даже языку.

Однако, несмотря на такое давнее происхождение, до сих пор не ясны основные причины и цели возникновения музыки. Во многом непонятно, как музыка воздействует на мозг, плохо изучены физиологические реакции живых организмов на музыку. Похоже, в мозгу нет какой-либо специализированной области, отвечающей за восприятие и обработку музыки. Однако, как показывают исследования, травмы в правом полушарии мозга вызывают более глубокие нарушения в восприятии музыки, чем травмы в левом. При этом обработка музыки мозгом захватывает не только неокортекс, но и эволюционно более древние, глубокие области мозга, связанные эмоциональным поведением — лимбическую область. Все это указывает на то, что истоки музыки как феномена необходимо искать в животном мире, поскольку даже среди птиц, не говоря уже о некоторых млекопитающих (например, у волков), можно найти зачатки музыкального поведения. Совсем недавно было обнаружено, что горбатые киты-самцы, издавая звуки во время репродуктивного периода, используют те же самые ритмические и мелодические структуры, что и люди в своих песнях.

В исследованиях N. Birbaumer и др. было обнаружено, что восприятие музыки проявляется в уменьшении фрактальной размерности ЭЭГ сигналов, то есть электрическая активность нейронных ансамблей становится более синхронной [1].

В недавней работе Patel и Balaban показали, что при восприятии музыки степень когерентности паттернов, образуемых магнитными полями мозга, повышается. Когда же человек воспринимает шумовые акустические сигналы, когерентность паттернов низка [2]. Известны редкие случаи провоцирования музыкой эпилепсии, которая проявляется в высокой степени синхронизации электрической активности нейронных ансамблей.

Эти экспериментальные данные позволяют сформулировать гипотезу, что музыка есть способ управления хаотической динамикой мозга и каждую музыкальную партитуру можно рассматривать как своеобразную программу управления хаотической динамикой электрической активности нейронных ансамблей.

В. Е. Бондаренко провел серию численных экспериментов с целью изучения возможности управления хаотической динамикой мозга [3–5]. Им была построена искусственная нейронная сеть, состоящая всего из десяти нейронов, аналогичная нейронной сети, предложенной Дж. Хопфилдом для моделирования процессов распознавания образов.

Искусственная нейронная сеть В. Е. Бондаренко генерирует хаотичный сигнал, очень похожий на ЭЭГ сигнал мозга с корреляционной размерностью $\nu = 5.2 - 7.1$ (в зависимости от порядкового числа нейрона) и безразмерным наибольшим ляпуновским показателем $\lambda = 0.017$ [3].

Пики частот в кумулятивном спектре из 10 нейронов в этой модели находятся в соотношении $0.12 : 0.28 : 0.46 : 1.04$. Аналогичные соотношения основных ритмов в ЭЭГ человека $2.3 : 5.5 : 10.5 : 21.5$, называемые дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмами, хорошо известны в нейрофизиологии [3].

Когда на такую нейронную сеть воздействует синусоидальная или периодическая импульсная сила, удается изменить степень хаотичности ее выходного сигнала с относительно большой размерности ($\nu \sim 5-8, \lambda > 0$) до малой размерности ($\nu \leq 3, \lambda > 0$), квазипериодического режима ($\nu \leq 3, \lambda \approx 0$) и периодического режима ($\nu \approx 1, \lambda \approx 0$) [4].

Такой малоразмерный хаотический ЭЭГ сигнал мозга наблюдается в том случае, когда частота внешней силы (синусоидальной или периодически повторяющихся импульсов) близка или совпадает с одной из собственных частот (дельта, тета, альфа, бета) нейронной активности в отсутствие внешней силы [5].

Мы можем предположить поэтому, что воздействие музыки на мозг также происходит вблизи этих собственных частот или их гармоник, поскольку, чтобы подавить хаос, вблизи резонансных частот требуется значительно меньшая амплитуда внешнего воздействия, чем вдали от них.

Но в модели нейронной сети, предложенной В. Бондаренко, имеется только четыре собственной, резонансной частоты, в то время как фортепиано содержит 84 клавиши, генерирующих 84 звука различной частоты. Чтобы разрешить это противоречие, нами была предложена нейросетевая модель музыкального лада, основанная на модели ассоциативной памяти Дж. Хопфилда.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ МУЗЫКАЛЬНОГО ЛАДА

В процессе развития музыки, в частности, мелодии, некоторые звуки выделились из общей массы, приобрели свойства устойчивых, опорных звуков, с которых обычно начинается и заканчивается мелодия. Среди таких устойчивых звуков один звук обычно выделяется больше, чем другие. Такой устойчивый звук получил название тоники. Второй по устойчивости звук называется медиантой и, наконец, третий по устойчивости звук — доминантой [6].

Другие звуки, участвующие в образовании мелодии, являются неустойчивыми, и им свойственно состояние тяготения (притяжения) к устойчивым звукам. Физический смысл понятий «устойчивый звук», «неустойчивый звук», «тяготение» будет пояснен ниже.

Неустойчивые звуки располагаются между устойчивыми, тяготея к ним. При этом интервалы между неустойчивыми и устойчивыми звуками являются диссонансными. Чем меньше интервал между устойчивым и неустойчивым звуком, тем сильнее тяготение.

Таким образом, взаимоотношение звуков по высоте в мелодии образует некоторую устойчивую структуру. Такую систему организующего взаимоотношения устойчивых и неустойчивых звуков в мелодии называют ладом, а сама музыка с такой системой организации звуков — это тональная музыка. Все известные мелодии относятся к тональной музыке. В противоположность ей музыка, в которой нет определенных организующих принципов для звуков различной высоты, называется атональной музыкой. Она возникла лишь в начале XX столетия.

В тональной музыке встречаются самые разнообразные лады, но все же наиболее широкое распространение получили мажорные и минорные. Мажорным называется лад, в котором интервалы между устойчивыми звуками образуют терции: между тоникой и медиантой находится большая терция (2 т), а между доминантой и медиантой — малая терция (1.5 т). Например, ноты до-ми-соль дают мажорное звучание. Отметим, что и большая и малая терции являются консонансными интервалами. Консонансные интервалы соответствуют звукам с наибольшей величиной корреляции составляющих их обертонов. В слуховом нерве консонансным интервалам отвечают наиболее гладкие и симметричные последовательности электрических импульсов.

Для того чтобы объяснить структуру и свойства музыкального лада, мы обратимся к модели ассоциативной памяти Дж. Хопфилда. Подчеркнем, что обращение к модели функциональной деятельности мозга для объяснения структуры музыкальной мелодии не только

уместно, но и необходимо, поскольку музыка, как и все искусство в целом, должны функционировать в соответствии с законами функционирования психики.

Наиболее наглядно структуру и функцию музыкального лада можно изобразить на потенциальной функции нейронной сети Хопфилда. Потенциальная функция нейронной сети представляет собой набор минимумов и максимумов, где каждому минимуму соответствует определенный хранящийся в памяти образ-прототип. Распознавание нового образа такой нейронной сетью описывается как тяготение этого образа к ближайшему минимуму, то есть к образу, с которым у него имеется наибольшее сходство.

Если воспользоваться этой моделью ассоциативной памяти, то естественно устойчивые звуки мелодии соотнести с минимумами соответствующей функции Хопфилда (образами-прототипами), а максимумам этой функции будут соответствовать неустойчивые звуки, которые будут тяготеть к ближайшему минимуму. В таком случае потенциальную функцию Ляпунова «мажорный лад» мы можем изобразить следующим образом [7,8]:

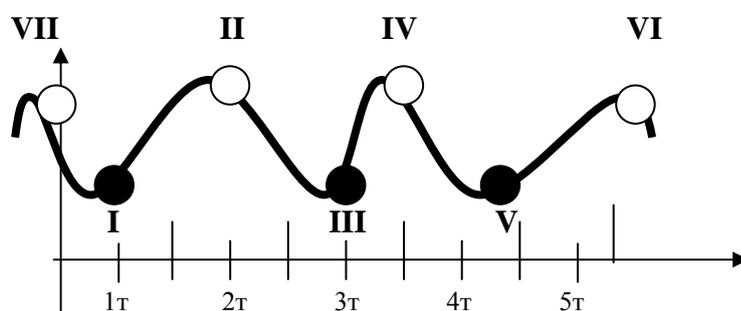


Рисунок 1. Нейросетевая модель мажорного лада. Черный кружок изображает устойчивые звуки, белый — неустойчивые.

В такой модели структуры и функционирование музыкального лада, понятие «тяготение» одного звука к другому в мелодии приобретают простой физический (механический) смысл.

Степень неустойчивости ступени (степень тяготения к устойчивому звуку) зависит от расстояния между неустойчивым и устойчивым звуками и от степени устойчивости звука, к которому направлено тяготение. Наиболее острое тяготение VII ступени к I, IV ступени к III и II к I.

В минорном ладе, по сравнению с мажорным, большая и малая терции расположены зеркально симметрично. Например, звуки до-ми-бемоль-соль имеют минорное звучание.

Подчеркнем, что, благодаря обертоновой структуре каждого музыкального звука, между тоникой, медиантой и доминантой существует сильная корреляционная связь, что указывает на то, что структура музыкального лада уже сама по себе есть феномен культуры.

В музыке Китая, Вьетнама, а также у некоторых народов России (у татар и башкир, например) используется пентатоника, в которой отсутствуют два неустойчивых звука. Мажорный лад пентатоники можно изобразить следующим образом [8]

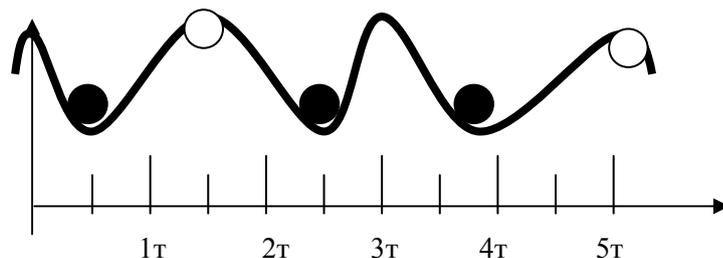


Рисунок 2. Энергетическая функция мажорного лада в пентатонике.

Изображая потенциальный ландшафт музыкальных ладов для модели ассоциативной памяти Хопфилда, мы смогли точно показать лишь расстояния между экстремумами этой функции, глубины же минимумов и высоты максимумов даны нами условно. Как следует из модели Хопфилда, величины этих экстремумов зависят главным образом от числа нейронов в нейронной сети и от числа и силы связей между нейронами: чем больше нейронов в сети, чем больше связей и чем сильнее связаны нейроны между собой, тем более глубокие минимумы имеет соответствующая энергетическая функция.

В связи с этим можно высказать гипотезу, что вид потенциальной функции лада являются чрезвычайно индивидуальным для каждого человека, и глубина ее минимумов отражает музыкальные способности (музыкальную одаренность) человека. Чем более одаренным к музыке является человек, тем глубже расположены минимумы в его потенциальной функции. И наоборот, человек со слабыми музыкальными способностями имеет энергетический ландшафт с очень мелкими минимумами.

В музыкальном звукоряде ноты «ре» разных октав (как и любые ноты с интервалами, кратными октаве) распознаются нейронной сетью мозга как очень похожие звуки именно потому, что у этих звуков очень похожая (практически совпадающая) структура обертонов (другими словами, обертоновая структура этих звуков имеет максимальную корреляцию).

Можно предположить, что все виды мажорных тональностей, как в западной музыке, так и в пентатонике, принадлежат бассейну одного и того же аттрактора, а все виды минорных тональностей — бассейну другого.

Поскольку музыка действует на нейронную сеть мозга как внешняя сила, резонансное действие трех устойчивых ступеней мажорного лада через слуховой нерв можно изобразить следующим образом:

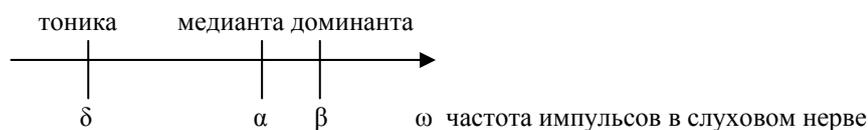


Рисунок 3. Резонансное воздействие устойчивых ступеней мажорного лада

Это означает, что частота импульсов в слуховом нерве, соответствующих тонике, медианте и доминанте, совпадает с частотами дельта, альфа и бета ритмов.

Действие минорного лада на мозг можно изобразить аналогичным образом:

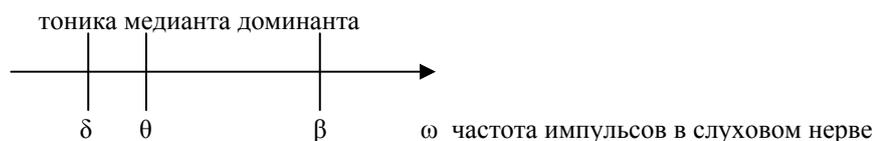


Рисунок 4. Резонансное воздействие устойчивых ступеней минорного лада

И в этом случае частота импульсов в слуховом нерве, соответствующих тонике, медианте и доминанте, совпадает с частотами дельта, тета и бета ритмов.

Суммарное действие музыкального произведения, состоящего из мажорных и минорных тональностей, можно представить так:

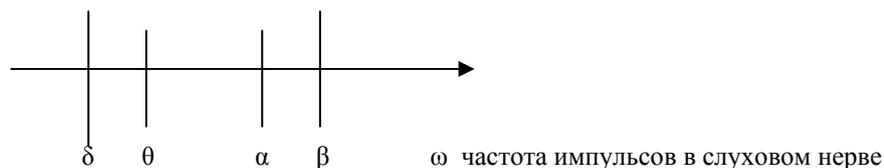


Рисунок 5. Резонансное воздействие устойчивых ступеней мажорного и минорного лада

Таким образом, мы имеем четыре различных внешних силы с четырьмя разными частотами, действующих на четыре основные (резонансные) частоты нейронной сети.

О механизме воздействия музыки на организм человека и животных

В последние годы все большее признание получает гипотеза, что интеграция мозгом отдельных признаков объекта в единый образ на нейронном уровне реализуется за счет повышения уровня корреляции отдельных нейронов, или, иными словами, путем синхронизации нейронной активности различных групп нейронов мозга [9]. В исследованиях В. Зингера и Р. Экхорна у кошек, подвергнутых анестезии, при предъявлении зрительных стимулов в виде ярких ориентированных движущихся отрезков регистрировали синхронизацию осцилляторов активности удаленных друг от друга участков коры [10].

Высказывается предположение, что в процессах синхронизации отдельные признаки объекта кодируются с помощью фаз групп осциллирующих нейронов, а объединение этой информации в единый образ происходит за счет синхронизации колебаний соответствующих групп осцилляторов.

Все виды инстинктивного поведения (безусловные рефлексy): репродуктивное и пищевое поведение, агрессия и страх — представляет собой интеграцию функций различных областей мозга, и в связи с этим можно предположить, что каждый тип инстинктивного поведения связан с одной из собственных частот мозга — дельта, тета, альфа и бета ритмами, на базе которых с использованием механизма синхронизации и реализуются все виды безусловных рефлексов.

Итак, нами предложен механизм, посредством которого музыка может продуцировать физиологическую активность, связанную с врожденными рефлексами, являющимися базовыми формами поведения любого живого организма. И такая связь музыки с инстинктивным поведением действительно имеет место [12, 13].

Музыка и половой инстинкт. Пение птиц и звуки, издаваемые некоторыми животными (вой волков, звуки китов), связаны главным образом именно с репродуктивным поведением. У человека хорошо известна связь между голосом и половыми функциями. У мальчиков в период полового созревания «ломается» голос. Это обусловлено тем, что длина голосовых связок начинает сильно увеличиваться в период полового созревания, когда в крови появляется мужской гормон тестостерон [14], и вплоть до девятнадцатого века партии сопрано и контральто в итальянской опере, как мы знаем, исполнялись кастратами. Некоторые оперные партии раньше специально и писались для кастратов [14]. Недавно было обнаружено, что прослушивание классической музыки вызывает изменение уровня тестостерона в крови [15].

Музыка и пищевой инстинкт. Веселая, возбуждающая музыка усиливает деятельность пищеварения, и поэтому все пиры обычно сопровождают такой музыкой. Известно, что Байрон, к примеру, страдал расстройством пищеварения, и ему удалось избавиться от этого недуга в значительной степени благодаря тому, что во время трапезы ему постоянно играл оркестр [12].

Как известно, в психологии безусловные рефлексy называют эмоциями. Это — базовые эмоции, аналогичные трем базовым цветам (красный, синий, зеленый), из которых путем перемешивания можно получить любые другие цвета.

Можно предположить, что и музыка — благодаря метроритмической (временной) организации — также смешивает в определенных пропорциях базовые эмоции, вызываемые резонансным воздействием устойчивых ступеней лада, создавая в каждом музыкальном произведении свою собственную палитру эмоциональных переживаний.

Автор выражает благодарность В. Е. Бондаренко за предоставленные материалы по управлению хаотической динамикой мозга и Б. М. Галееву за обсуждение некоторых вопросов, затронутых в статье, за помощь в подборе литературы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Birbaumer N., Lutzenberger W., Rau H., Mayer-Kress G., Braun C.* Perception of Music and Dimensional Complexity of Brain Activity // *International Journal of Bifurcations and Chaos*, 1996, 6 (2), p. 267–278.
2. *Patel A., Balaban E.* Temporal Patterns Of Human Cortical Activity Reflect Tone Sequence Structure // *Nature*, 2000, 403 (6773).
3. *Bondarenko V. E.* Analog Neural Network Model Produced Chaos Similar to the Human RRG // *International Journal on Bifurcation and Chaos*, 1997, v. 7, № 5, p. 1133–1140.
4. *Bondarenko V. E.* High-Dimensional Chaotic Neural Network under External Sinusoidal Force // *Physics Letters A* 236, p. 413–419.
5. *Bondarenko V. E.* Control and “anticontrol” of chaos in an analog neural network with time delay // *Chaos, Solotons, and Fractals* 13 (2002), p. 139–154.
6. *Красинская Л., Уткин В.* Элементарная теория музыки. Москва: Музыка, 1998.
7. *Yevin I., Arjonova S.* Attractor network model and structure of musical tonality // *Abstracts of the 9th Conference Society for Chaos Theory in Psychology and Life Sciences*. Berkeley, CA, USA, July, 1999.
8. *Евин И. А.* Синергетика мозга и синергетика искусства. Москва: ГЕОС, 2001.
9. *Basar E., Haken H.* (Editor). *Brain Function and Oscillations: Integrative Brain Function, Neurophysiology and Cognitive Processes*. Vol. 2. New York: Springer, 2000.
10. *Singer W.* Neuronal representations, assemblies and temporal coherence // *Progress in Brain Research*, 1993, № 95, p. 461–474.
11. *Fukui Hajime.* Music and Testosterone. In *The Biological Foundations of Music* / Robert Zatorre (Editor). 2000, p. 448-451.
12. *Догель И. М.* Влияние музыки на человека и животных. Казань: типография Императорского университета, 1897.
13. *Тарханов И. П.* О влиянии музыки на человеческий организм // *Северный вестник*, 1893, № 1.
14. *Peschel E. R., Peshel R. E.* Medical Insights into the Casrati in Opera // *American Scientist*, 1987, № 6, p. 578–583.