

2. ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКА

2.1. Основные понятия

Изучением воздействия всех внешних стимулов (звука, света, давления, запахов, химических веществ – носителей вкусовых ощущений) на сенсорные органы человека (слух, зрение, осязание, обоняние, органы вкуса) занимается наука, которая называется *психофизикой*. Эта наука занимается анализом физических явлений, происходящих в окружающем нас мире, и пытается связать характер их воздействия на человека с изменениями в наших внутренних ощущениях, стремясь к тому же выразить эту взаимосвязь количественно.

Тот раздел психофизики, который посвящен изучению восприятия человеком звука, называется психоакустикой.

Психоакустика – это наука о количественных зависимостях между внешними стимулами (физическими параметрами звука) и ощущениями (психическими параметрами), которые они вызывают [1–9].

Для того чтобы в дальнейшем более осмысленно использовать термин «стимул», дадим ему следующее определение.

Стимулами или *раздражителями* называются такие физические воздействия на субъект (человека), которые потенциально способны вызвать у него ощущения – в отличие от тех, которые вызвать ощущения не могут принципиально. Например, звуки в пределах диапазона частот, которые человек способен услышать, независимо от их уровня (даже если уровень одного из таких звуков лежит в данный момент ниже порога слышимости), считаются стимулами, а вот акустические колебания вне этого диапазона уже стимулами не являются – также независимо от их уровня.

Совокупность стимулов, существующих вблизи субъекта, т. е. человека, называют *полем восприятия* или *перцептивным полем*. В помещении, где происходит прослушивание какой-либо музыкальной или речевой программы, полем восприятия является звуковое поле.

Звуковое поле – это область пространства, в которой распространяются звуковые волны. Звуковое поле представляет собой колебания частичек воздушной среды, возбуждаемые колебаниями поверхности источника (например, диафрагмами акустических систем).

2.2. Структура слуховой системы человека

Назначение слуховой системы человека состоит в формировании у него слуховых ощущений в ответ на воздействие звуковых волн, представляющих собой колебания молекул воздуха (или другой упругой среды, например – воды).

Слуховая система человека – это очень сложный приемник звуковой информации. Ее можно разделить на две подсистемы: периферическую часть и высшие отделы, включающие слуховые зоны коры головного мозга, центральные слуховые пути и пр.

Периферическую часть слуховой системы принято делить на три части: наружное, среднее и внутреннее ухо. По аналогии с техническими устройствами, эту часть слуховой системы можно рассматривать как некий аналог входных цепей радиоприемного устройства. Однако принимает и обрабатывает это устройство не электромагнитные колебания, а акустические. Тем не менее все атрибуты входных цепей радиоприемного устройства здесь присутствуют: акустическая антенна, дифракционный фильтр и предварительный усилитель, которые локализуют, фокусируют и усиливают звуковой сигнал; микрофон, преобразующий акустический сигнал в электрический; анализатор спектра с высокой разрешающей способностью; аналого-цифровой преобразователь; нелинейный компрессор и усилитель; процессор предварительной обработки сигнала и пр.

Высшие отделы слуховой системы также можно сравнить с электронным устройством, причем куда более сложным, чем предыдущее. По объему и быстрдействию оно сопоставимо с мощным компьютером, выполняющим множество разнообразных операций по цифровой обработке звукового сигнала. Здесь происходит выделение (декодирование) полезных звуковых сигналов из шумовой смеси, группировка этих сигналов по определенным признакам, сравнение их с хранящимися в памяти образами и определение их информационной ценности. После чего производится смысловая расшифровка выделенных сигналов и формируется целостный слуховой образ. При необходимости принимается решение об ответных действиях.

2.2.1. Периферическая часть слуховой системы

Общая структура периферической части слуховой системы показана на рис. 2.1.

Наружное ухо состоит из *ушной раковины* и *слухового прохода*, заканчивающегося тонкой мембраной, называемой *барабанной перепонкой*. Наружное ухо выполняет функцию акустической антенны, которая обеспечивает локализацию звуков в горизонтальной и вертикальной плоскостях, их концентрацию и избирательное усиление, а также предохраняет барабанную перепонку и расположенные за ней структуры среднего и внутреннего уха от травматических воздействий.

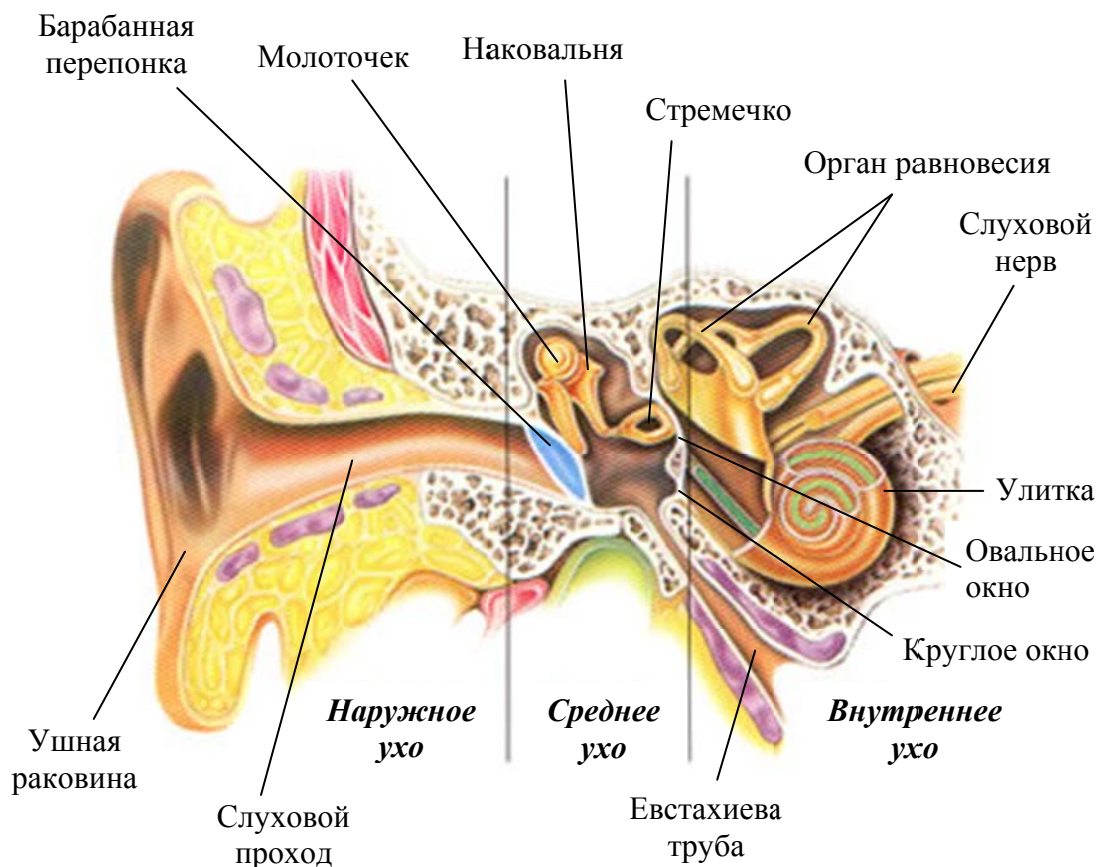


Рис. 2.1. Строение периферической части слуховой системы человека

Ушная раковина (рис. 2.2) представляет собой сложную структуру из покрытого кожей эластичного хряща (длиной примерно 6,7 см), разделенную внутри на несколько полостей. Самая большая из этих полостей расположена в непосредственной близости к слуховому каналу и имеет объем порядка $3,8 \text{ см}^3$. Форма и размеры ушной раковины, а также всех ее частей имеют очень важное значение, поскольку влияют как на точность локализации источника звуковых колебаний, так и на огибающую спектра воспринимаемого звука. При падении звуковой волны под разными углами к медианной плоскости головы за счет дифракции, отражений от различных элементов ушной раковины и резонансов, возбуждаемых в ее полостях, происходит как изменение временной структуры звукового сигнала, поступающего в слуховой канал, так и изменение его спектральных характеристик.

Благодаря своей сложной форме ушная раковина играет роль дифракционного фильтра, который изменяет спектральные свойства воспринимаемого на слух звукового сигнала, особенно в области 3–10 кГц. Кроме того, форма ушных раковин и характер их расположения относительно головы (угол наклона относительно медианной плоскости головы) влияют на характеристику направленности слуховой системы. Все эти факторы, а также неизбежно возникающая временная и интенсивностная разница

в характере сигналов, воспринимаемых левым и правым ухом, позволяют человеческому слуху осуществлять локализацию источника сигналов в горизонтальной плоскости с точностью до 3° , в вертикальной – $10\text{--}12^\circ$. Эксперименты показали, что прижатие раковины к голове (или заполнение ее полостей поглощающим материалом) резко ухудшает точность локализации, особенно в вертикальной плоскости. По этой причине при прослушивании стереофонических программ через головные телефоны никакой звуковой панорамы оркестра не возникает – звучащий образ формируется в «центре» головы слушателя [10–12].



Рис. 2.2. Ушная раковина

Расстояние между ушами (*интерауральная база*) у взрослого человека составляет в среднем 21 см. Эта величина называется *константой Хорнбостеля – Верхтеймера*.

Ушные раковины у человека сформированы индивидуально, причем столь же индивидуально, как и отпечатки пальцев. В криминалистике даже существует концепция идентификации человека по форме его ушной раковины.

Физиогномисты утверждают, что форме и строению ушной раковины можно определить характер и наклонности человека. Например:

- у людей, одаренных музыкальными способностями, уши большие, тонкие, несколько оттопыренные, нередко – поросшие волосами;

- очень тонкие, почти просвечивающие уши характеризуют людей пылких, нервных, раздражительных;
- маленькие, прижатые к голове ушки – признак лживости и мстительности;
- уши, покрытые пушком, выдают человека со страстным темпераментом и не очень-то разборчивого в любовных связях;
- маленькие, нормально оттопыренные, аккуратные ушки свидетельствуют о деликатности, утонченности вкуса и любви к порядку;
- большие уши говорят о щедрости, чуткости, доброте и готовности выслушать чужое мнение;
- круглые уши указывают на доброту и умение сотрудничать;
- длинные, узкие уши предупреждают: перед вами суквец;
- мочки ушей, приросшие к шее, говорят об упрямстве, способности рисковать и идти напролом;
- жесткие уши говорят о хорошем здоровье, а мягкие и дряблые – о слабосилии.

Особенности строения ушей могут служить своеобразным диагнозом. Медицинская статистика свидетельствует, что у людей, уши которых имеют маленькие мочки, рано или поздно возникают проблемы с сердцем. А обладателям тонких, просвечивающих ушей стоит обратить внимание на работу желудка.

Слуховой канал (проход) выполняет следующие основные функции: защищает барабанную перепонку от механических повреждений, согласовывает акустические сопротивления барабанной перепонки и внешней среды и повышает чувствительность слуха в области средних частот за счет продольных резонансов.

Слуховой канал представляет собой костно-хрящевую трубку, наружный конец которой отходит от ушной раковины и распространяется вглубь головы вплоть до барабанной перепонки. Слуховой канал состоит из двух частей. Наружная, хрящевая часть, составляет примерно треть его общей длины, внутренние две трети представлены костной частью. В среднем длина слухового канала составляет 26–30 мм, диаметр – примерно 7 мм. Размеры и форма его различаются у разных людей.

Поскольку один конец слухового канала открыт, а второй закрыт барабанной перепонкой (мягкой мембраной, которая располагается под углом 30° к оси канала), то воспользовавшись формулой (2.1), которая используется в физике для расчета резонансов трубы, закрытой с одного конца и открытой с другого, можно приблизительно определить его собственные резонансные частоты:

$$f_n = (2n + 1) C/4L, \quad (2.1)$$

где L – длина слухового канала;

C – скорость распространения звука в воздухе (~340 м/с);

n – порядок резонанса.

Если принять длину слухового канала L , равной 3 см (0,03 м), то первый резонанс его будет наблюдаться на частоте 2870 Гц, второй на частоте 8610 Гц и т. д. На резонансных частотах звуки, попадающие на барабанную перепонку через слуховой канал, усиливаются. Наибольшее усиление наблюдается на первой резонансной частоте – до 10 дБ и даже более. Именно наличием резонансов в слуховом канале и объясняется тот факт, что область максимальной чувствительности слуха находится в пределах 2–5 кГц. А совместное действие ушной раковины и слухового канала за счет дифракционных и резонансных эффектов обеспечивает общее усиление звука, поступающего на барабанную перепонку вплоть до 15–20 дБ (в пределах полосы частот 2–5 кГц). Величина такого усиления зависит от угла падения звуковой волны.

Барабанная перепонка – это тонкая полупрозрачная мембрана, которая отделяет слуховой канал от полости среднего уха. Толщина ее 0,07–0,1 мм, форма – у взрослых эллиптическая, у детей – круглая. Большой диаметр барабанной перепонки взрослого человека – 9,5–10,0 мм, меньший – 8,5–9,0 мм, площадь поверхности примерно 0,8 см². Средняя ее часть представляет собой вогнутый в сторону среднего уха конус, вершина которого соединена с рукояткой молоточка (рис. 2.3). За счет различной длины стенок слухового канала нижняя часть барабанной перепонки расположена глубже, чем верхняя. Из-за этого между барабанной перепонкой и стенками слухового прохода в нижнем отделе образуется острый угол в общем случае приблизительно в 27°, а в верхнем – в 140°. Однако у разных людей эти величины могут достаточно сильно отличаться от среднестатистических.



Рис. 2.3. Структура среднего уха

Звуковые волны, попадающие в слуховой проход, вызывают колебания барабанной перепонки, которая также имеет свои собственные резонансные частоты, на которых звук усиливается. На этих частотах для того чтобы звук был человеком воспринят, достаточно смещения барабанной пере-

понки на расстояние, меньшее, чем диаметр атома водорода ($\sim 1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм}$). Именно здесь происходит преобразование акустических колебаний воздушной среды в механические колебания мембраны, которые в дальнейшем обрабатываются и преобразуются в среднем и внутреннем ухе.

Среднее ухо представляет собой воздушную полость в височной кости объемом примерно 1 см^3 (*барабанная полость*), внутри которой находятся три слуховые косточки: молоточек, наковальня и стремечко (рис. 2.3). Эти косточки передают звуковые колебания из наружного уха во внутреннее, одновременно усиливая их. Слуховые косточки – самые маленькие фрагменты скелета человека. Молоточек имеет длину 7–8 мм, массу 27 мг; наковальня – длиной 7 мм, массой 25 мг; стремечко – длиной 4 мм, массой 25 мг. Рукоятка молоточка своим основанием прикреплена к вершине конуса барабанной перепонки, головка молоточка подвижно соединена с наковальней, а та, в свою очередь, с помощью удлиненного отростка – со стремечком, которое передает звуковые колебания во внутреннее ухо через овальное окно. В местах сочленений слуховых косточек между собой имеются два настоящих сустава с ограниченной подвижностью.

Среднее ухо выполняет три функции: передачу и усиление звуковых колебаний за счет работы рычажного механизма косточек; согласование импеданса воздушной среды с жидкой средой внутреннего уха (улитки); защиту внутреннего уха от громких звуков за счет акустического рефлекса.

Разница между импедансом жидкости во внутреннем ухе и воздуха составляет $4000 : 1$, поэтому если бы не было среднего уха, то энергии звуковой волны было бы недостаточно, чтобы обеспечить требуемую амплитуду колебаний упругой мембраны овального окна внутреннего уха и большая ее часть (99 %) просто отражалась бы от поверхности этой мембраны. Острота слуха человека была бы при этом крайне низкой. Поэтому основной задачей среднего уха является согласование импедансов внешней воздушной среды и жидкости во внутреннем ухе путем механического усиления энергии звукового давления, передаваемой от барабанной перепонки к овальному окну улитки (рис. 2.1). Для этого используются два механизма увеличения силы, воздействующей на мембрану овального окна. Во-первых, поскольку рукоятка молоточка в 1,5 раза длиннее отростка наковальни, то система подвижных рычагов разной длины молоточек – наковальня – стремечко обеспечивает выигрыш в силе в 1,5 раза. Во-вторых, выигрыш в силе получается еще и за счет того, что соотношения площадей барабанной перепонки ($\sim 70 \text{ мм}^2$) и овального окна ($\sim 3 \text{ мм}^2$) равно примерно $20 : 1$. Общий выигрыш по звуковому давлению при этом составляет почти 30 дБ. Если сюда добавить усиление за счет собственных резонансов барабанной перепонки, то общее увеличение уровня звукового давления получается примерно 40 дБ. Поэтому, несмотря на значительную разницу в плотностях внешней воздушной среды и жидкости в улитке внутреннего уха, разница эта в достаточной степени компенсируется за

счет увеличения уровня звукового давления на мембрану овального окна внутреннего уха [4].

Еще одной важной функцией среднего уха является защита внутреннего уха от повреждений при чрезмерно высоких уровнях звукового давления. Когда звуковое давление велико, амплитуда колебаний слуховых косточек уменьшается вследствие рефлекторного сокращения двух мышц, прикрепленных к рукоятке молоточка и стремечку. При сокращении одной из них увеличивается натяжение барабанной перепонки, что ведет к уменьшению амплитуды ее колебаний [3, 4, 9]. Сокращение другой мышцы оттягивает стремечко от овального окна и ограничивает его колебания. Эти мышцы обеспечивают адаптацию слуховой системы к звукам высокой интенсивности. Механизм адаптации начинает действовать не сразу, а примерно через 10 мс после начала действия звука, превышающего уровень 40 дБ. Поэтому от воздействия более коротких импульсов ухо, к сожалению, не защищено. Такой механизм адаптации среднего уха называется *акустическим рефлексом*. При этом для частот от 1000 Гц и выше снижение уровня составляет примерно 20 дБ, т. е. среднее ухо в данном случае действует как линейный фильтр низких частот [3].

В обычных условиях давление воздуха внутри среднего уха должно быть равно внешнему атмосферному давлению, т. е. есть давление, действующее на обе стороны барабанной перепонки, должно быть уравновешено. При нарушении этого условия – например во время набора высоты самолетом или при его снижении, когда давление внутри среднего уха остается прежним, а внешнее давление быстро меняется, барабанная перепонка может быть повреждена. Поэтому в структуре среднего уха предусмотрен механизм его защиты от перепадов атмосферного давления – узкая трубка длиной 35–40 мм, соединяющая его внутреннюю полость с носоглоткой – *евстахиева труба*. В нормальных условиях стенки евстахиевой трубы сомкнуты, но при глотательных движениях они раскрываются, и это позволяет выравнивать давление в среднем ухе по атмосферному давлению.

Обычно звук попадает во внутреннее ухо через наружное и среднее ухо, однако существует и другой путь передачи звуковых колебаний – через костную ткань. В этом можно убедиться, если плотно закрыть чем-нибудь слуховые проходы и приложить к голове звучащий камертон. Или, скажем, постучать зубами. Звук будет хорошо слышен. Вибрации в этом случае будут проходить во внутреннее ухо через костную ткань, минуя среднее ухо. Такое явление используется в диагностике нарушений слуха. Если костная проводимость в порядке, а воздушная утрачена, значит поражено среднее ухо. Если отсутствует и костная проводимость, то можно заключить, что поражен слуховой нерв.

Слуховые ощущения, формируемые посредством костной проводимости, играют немаловажную роль при восприятии человеком собственной

речи. Вибрации голосовых связок, возбуждающие те звуковые колебания, которые через воздушную среду поступают в слуховые каналы к барабанным перепонкам, также приводят к вибрации окружающих костных структур, в том числе – челюстей, и эти вибрации передаются к внутреннему уху. Когда человек говорит или поет, он слышит две составляющие звучания своего голоса: одна передается через воздушную среду, другая – через костную ткань. Слушатели же воспринимают только те звуки, которые передаются воздушным путем. Компоненты, передаваемые к органам слуха говорящего через костную ткань (в основном это низкочастотные колебания), для них не существуют. По этой причине человек с трудом узнает собственный голос, когда слышит его в записи.

Внутреннее ухо является наиболее сложным отделом органов слуха и представляет собой костный лабиринт, состоящий из трех отделов – преддверия, полукружных каналов и улитки (рис. 2.4).

Преддверие и **полукружные каналы** – это органы равновесия и определения положения тела в пространстве. Полукружные каналы расположены в трех взаимно перпендикулярных плоскостях и заполнены полупрозрачной студенистой жидкостью – **эндолимфой**. Внутри каналов находятся чувствительные волосковые клетки, погруженные в эту жидкость. При малейшем перемещении тела или головы в пространстве эндолимфа в этих каналах смещается и изгибает волосковые клетки, которые формируют электрические импульсы в окончаниях вестибулярного нерва. При этом в мозг мгновенно поступает информация об изменении положения тела. Работа вестибулярного аппарата позволяет человеку точно ориентироваться в пространстве при самых сложных движениях. Например, ныряльщик, прыгая в воду с трамплина и несколько раз перевернувшись в воздухе, тем не менее после погружения в воду мгновенно узнает, где находится верх, а где низ.

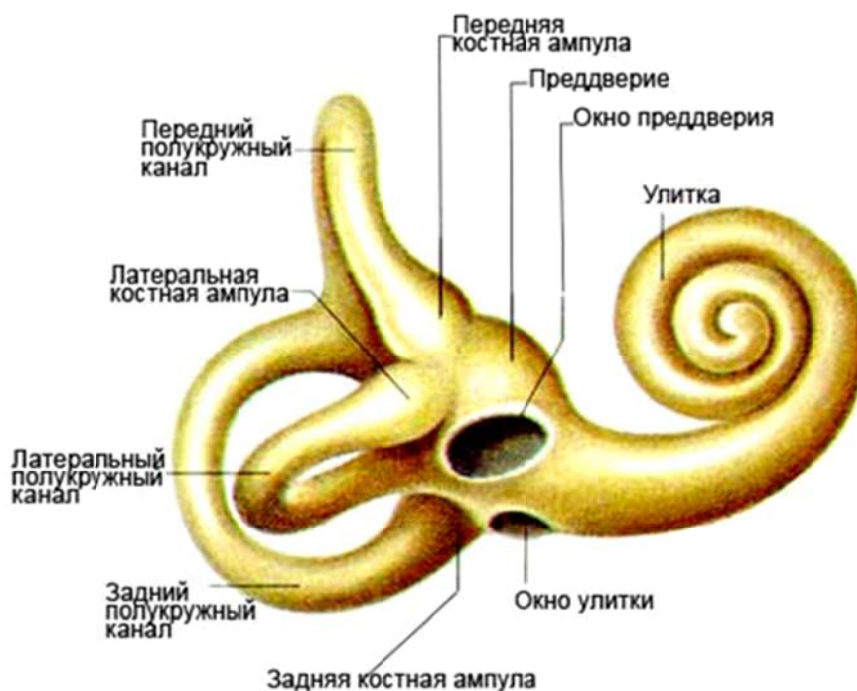


Рис. 2.4. Структура внутреннего уха человека

Улитка – это орган слуха. Представляет собой конусообразную трубку переменного сечения, расположенную в височной кости. Трубка свернута в спираль на $2\frac{3}{4}$ оборота, поэтому она получила название улитка. В развернутом состоянии улитка имеет длину 35 мм, площадь поперечного сечения у овального окна и стремечка 4 мм^2 , на противоположном конце (у круглого окна) – 1 мм^2 .

Внутренняя структура улитки чрезвычайно сложна. По всей длине она разделена на три полости или канала (рис. 2.5). Центральный канал называется **улитковым** или **кохлеарным**. Он проходит почти по всей длине улитки, разделяя таким образом ее объем еще на две полости. Верхняя полость называется **вестибулярным каналом**, а нижняя – **барабанным каналом**. Вестибулярный канал начинается у овального окна и соединяется с барабанным каналом через узкое отверстие – **геликотрему**, расположенную у вершины улитки (рис. 2.6).

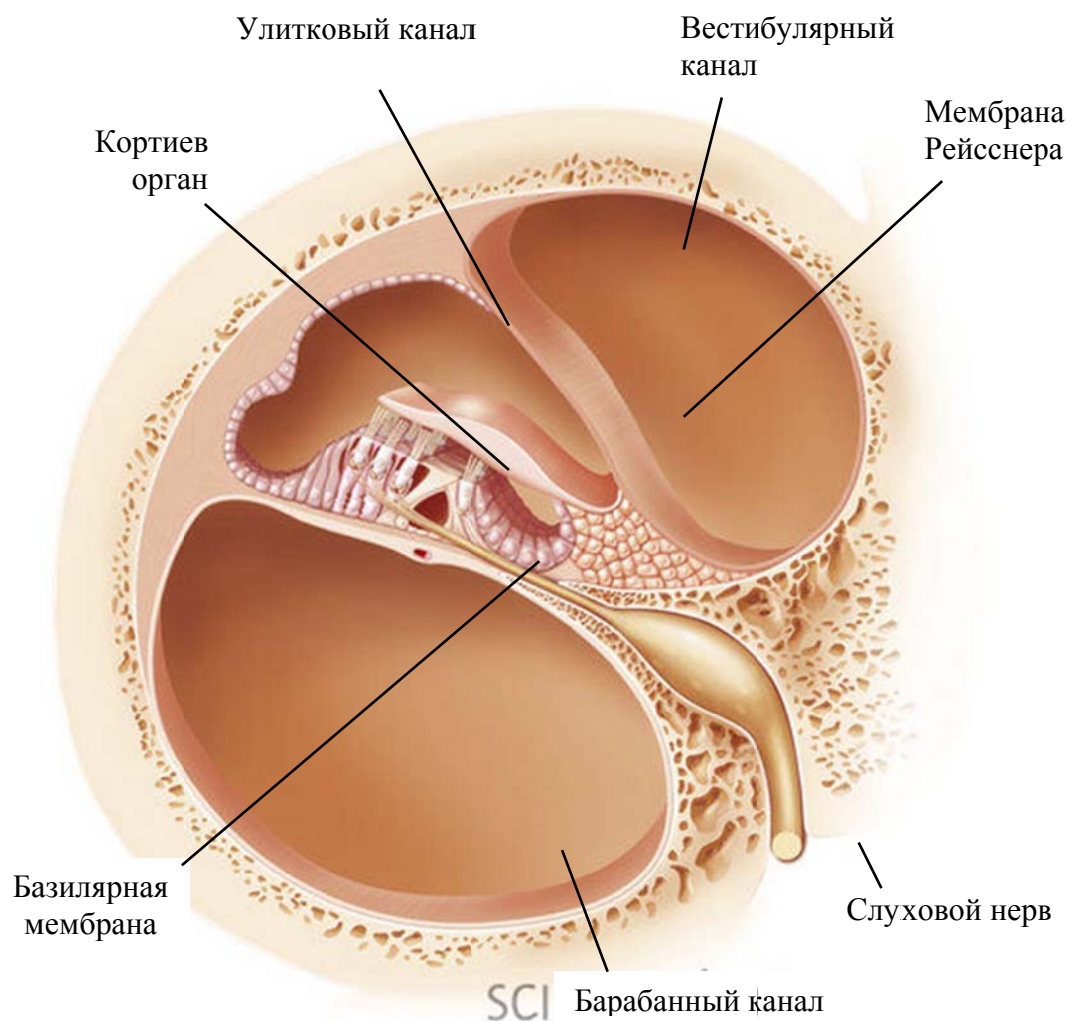


Рис. 2.5. Поперечный разрез улитки

Барабанный канал заканчивается так называемым **круглым окном**, которое, так же как и овальное окно, закрыто упругой мембраной. Все полости улитки заполнены жидкостью (улитковый канал – **эндолимфой**, а вестибулярный и барабанный – **перилимфой**). Эндолимфа вырабатывается специальным сосудистым образованием, расположенным на внутренней стороне **мембраны Рейсснера**, которая отделяет улитковый канал от вестибулярного канала. Состав эндолимфы отличается от состава перилимфы увеличенным в 100 раз содержанием ионов калия и в 10 раз меньшим содержанием ионов натрия. Эндолимфа по отношению к перилимфе заряжена положительно. Между улитковым и барабанным каналами располагается **базиллярная мембрана**.

Базиллярная мембрана состоит из нескольких тысяч поперечных волокон. Общая длина ее около 32 мм. Несмотря на то, что сама улитка к верхушке сужается, ширина базиллярной мембраны наоборот увеличивается – у стремечка ее ширина равна 0,05 мм, а у геликотремы достигает 0,5 мм. Одновременно с изменением ширины меняется и эластичность базиллярной мембраны – у основания улитки ее жесткость примерно в 100 раз выше, чем у вершины.

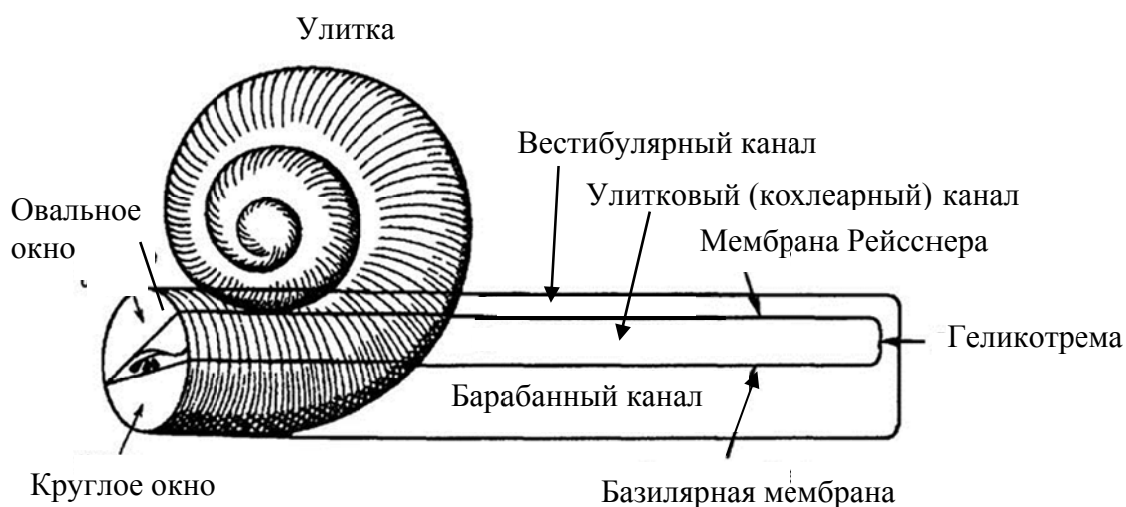
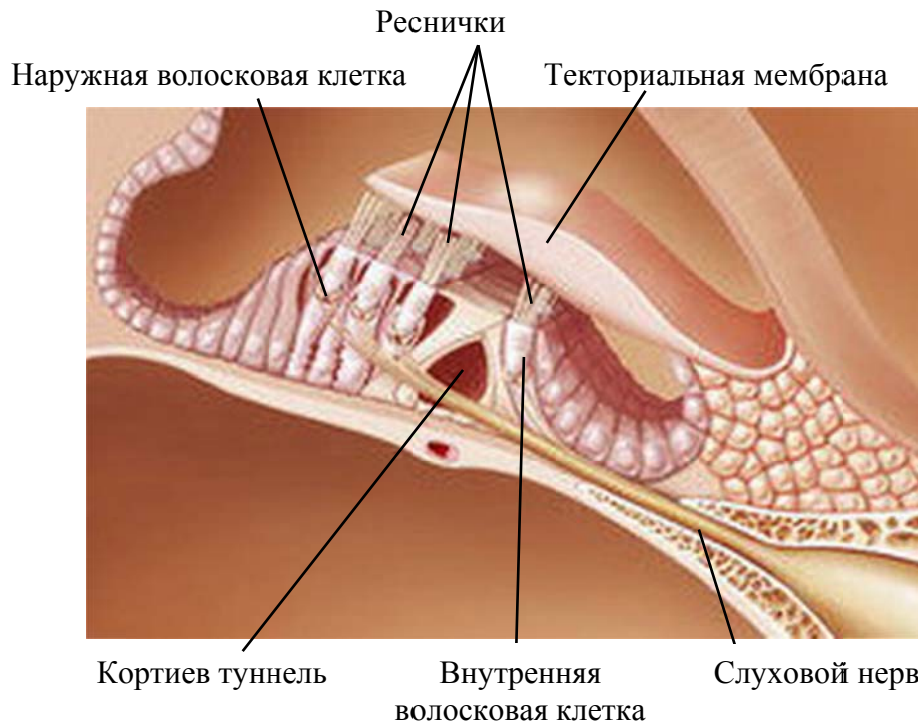


Рис. 2.6. Улитка в развернутом состоянии

На внутренней стороне базиллярной мембраны располагается специализированная сенсорная структура, которая преобразует механическую энергию движения жидкости в улитке, возникающего при воздействии звуковых колебаний, в электрические импульсы, которые затем через слуховой нерв передаются в высшие отделы слуховой системы. Эта структура называется **органом Корти** в честь итальянского ученого Альфонсо Корти, который первый описал ее в 1851 г. (рис. 2.7).

Орган Корти распределен вдоль поверхности базилярной мембраны и включает в себя две группы так называемых **волосковых клеток**, отделенных друг от друга **кортиевым туннелем**. Клетки одной группы называются **внутренними волосковыми клетками (ВВК)**, их количество равно примерно 3500. Клетки другой группы называются **наружными волосковыми клетками**



ми (НВК), их гораздо больше, чем внутренних, и число их достигает 20000. Внутренние волосковые клетки располагаются с одной стороны кортиева туннеля в один ряд, а наружные – с другой стороны в три ряда (рис. 2.7).

Рис. 2.7. Строение органа Корти

На каждой ВВК имеется по 50–70 чувствительных нитевидных ресничек (**стереосциллий**), на каждой НВК – по 40–150 таких ресничек. Реснички располагаются на волосковой клетке таким образом, что по форме напоминают букву W. Верхние концы ресничек частично внедрены в **покровную (текториальную) мембрану**, которая подобно ленте покрывает волосковые клетки сверху. От волосковых клеток через туннель отходят более 50 000 восходящих слуховых нервных волокон, которые образуют слуховой нерв и передают информацию в мозг. К этим же клеткам подходят нисходящие нервные волокна. Однако количество нервных волокон, связанных с ВВК и НВК, отнюдь не пропорционально их количеству: 90–95 % восходящих волокон связано с относительно немногочисленными внутренними волосковыми клетками и только 5–10 % с более многочисленными наружными. Что же касается нисходящих волокон, то для них соотношение примерно обратное. Можно предположить, что внутренние и наружные во-

лосковые клетки выполняют разные функции. ВВК в основном передают в мозг данные о внешних звуковых событиях, кодируя информацию о частоте звука, а НВК больше приспособлены для передачи приказов мозга, связанных с изменением чувствительности слуха. Видимо в условиях слабой слышимости через них передаются сигналы, вызывающие смещение базилярной мембраны, благодаря чему реакция ВВК на частоту звука становится более обостренной [9].

Акустические колебания передаются через слуховые косточки среднего уха овальному окну на входе улитки и вызывают в ней движение жидкости, которая при увеличении давления начинает перемещаться через геликотрему из вестибулярной полости в барабанную полость, вызывая при этом смещение упругой мембраны круглого окна в сторону, противоположную движению стремечка. При обратном движении стремечка жидкость за счет упругости круглой мембраны выталкивается обратно. Такие перемещения жидкости вызывают колебания базилярной мембраны, в которой возникает бегущая волна, перемещающаяся от основания улитки к ее вершине (к геликотреме).

Существуют две основные теории слуха, объясняющие механизмы преобразования акустического возбуждения в сенсорных системах внутреннего уха и обработки полученной информации: теория места и временная теория.

В соответствии с *теорией места*, каждой частоте стимула (акустического колебания) соответствует свое строго определенное место на базилярной мембране. Другими словами, базилярная мембрана организована «тонотопически», т. е. каждый тон имеет свою топографию размещения. Исследования показали, что расположение максимумов бегущей волны зависит от частоты звуковых колебаний: при высокочастотном возбуждении максимумы образуются вблизи основания улитки, а при понижении частоты смещаются к ее вершине в сторону геликотремы. При этом волосковые клетки, расположенные у основания базилярной мембраны, отличаются повышенной чувствительностью к высоким частотам, а волосковые клетки, расположенные вблизи вершины улитки, напротив, более активно реагируют на стимуляцию низкими частотами. По такому же принципу организованы и все остальные уровни слуховой системы – от нервных волокон, исходящих от базилярной мембраны, до слуховых участков коры головного мозга. Таким образом, нервные волокна, связывающие базилярную мембрану с корой головного мозга, передают информацию о тех участках базилярной мембраны, которые в данный момент подвергаются возбуждению. Иными словами, основой теории места является представление о том, что разные частоты возбуждают разные участки базилярной мембраны и, как следствие, непосредственно связанные с этими участками волосковые клетки, исходящие от этих клеток волокна слухового нерва и нейронные структуры коры головного мозга.

Преобразование механических колебаний жидкости в электрические сигналы, которые передаются по нервным волокнам в кору головного мозга, происходит в волосковых клетках. Когда базилярная мембрана колеблется, то волосковые клетки, которые на ней располагаются, смещаются и упираются в текториальную мембрану. Это приводит к изгибу ресничек, которые в этом случае генерируют электрические импульсы.

Первая версия теории места была высказана еще Гельмгольцем в 1863 г. и носила название *резонансной теории слуха*. В соответствии с его представлениями, базилярная мембрана состоит из большого количества (около 24000) поперечных волокон разной длины: у вершины улитки они самые длинные, а по мере перемещения к ее основанию длина волокон уменьшается. Каждое волокно, подобно струне музыкального инструмента, настроено на определенную частоту колебаний. Когда до улитки доходят звуковые колебания определенных частот, то резонировать начинают только те группы волокон, которые на эти частоты настроены, и соответственно, возбуждаются те клетки органа Корти, которые соединены с этими волокнами. Наиболее короткие волокна, расположенные у основания улитки, реагируют на самые высокие звуки, а самые длинные, расположенные у ее вершины – на самые низкие.

Уточнил и экспериментально доказал теорию места только Георг фон Бекеш (1899–1972), когда открыл физический механизм возбуждения во внутреннем ухе и стал первым физиком – лауреатом Нобелевской премии в области физиологии и медицины (1961). Ему удалось измерить колебания базилярной мембраны и установить, что ведет она себя не как пианино с отдельными струнами, а как простыня, которую встряхнули за один конец. При вибрации мембраны овального окна базилярная мембрана начинает колебаться вся целиком, однако положение наиболее интенсивного ее движения (максимума бегущей волны) зависит от высоты звука. Высокие частоты вызывают колебания ближнего конца мембраны, а по мере понижения частоты вибрации смещаются к ее вершине.

На основании теории места был объяснен не только механизм восприятия звуков различных частот, но и то, как базилярная мембрана участвует в обработке информации об интенсивности звука (т. е. громкости). Предполагается, что чем интенсивней звук, тем больший участок базилярной мембраны участвует в его восприятии. При постоянной частоте амплитуда (высота пика) бегущей волны определяется интенсивностью звука. Увеличение амплитуды колебания базилярной мембраны усиливает стимуляцию ресничек волосковых клеток вследствие более тесного контакта с текториальной мембраной и повышает активность нервных волокон, что и приводит к усилению восприятия громкости. Таким образом, в соответствии с теорией места частотный анализ и восприятие высоты звука определяются строгой дифференциацией активности различных участков базилярной мембраны и тем, какие именно волоски возбуждаются.

Основной альтернативой теории места, сформулированной Бекеша, является *временная теория*, предложенная в 1886 г. британским физиком Э. Резерфордом, которую также называют *частотной* или *телефонной*. В соответствии с этой теорией базилярная мембрана колеблется как единое целое, повторяя частоту звуковых колебаний. В результате таких колебаний генерируются импульсы возбуждения с той же самой частотой. Следовательно, информация о частоте звуковых колебаний, формируемая в процессе колебаний структурных элементов улитки, передается слуховому нерву напрямую, что очень напоминает действие микрофонного капсуля телефонного аппарата (отсюда и телефонная теория).

В соответствии с временной теорией воспринимаемая высота звука определяется частотой следования импульсов по слуховому нерву, и, следовательно, роль анализатора в восприятии абсолютной высоты тона принадлежит мозгу.

Оказалось, однако, что гипотеза Резерфорда все феномены слуховых ощущений объяснить не в состоянии. Выяснилось, что нервные волокна могут передавать не более 1000 импульсов в секунду. Каким же образом тогда человек может воспринимать высоту тона с частотой более 1000 Гц?

В 1949 г. В. Вивер попытался модифицировать теорию Резерфорда. Он высказал предположение о том, что информация о частотах свыше 1000 Гц передается разными группами нервных волокон, каждая из которых активизируется в разное время. Если, например, одна группа нейронов передает 1000 импульсов в секунду, то следующая группа нейронов, активизируясь через 1 мс после первой, передаст оставшиеся – скажем, еще 1000 импульсов. Таким образом, за 1001 мс будет передано 2000 импульсов.

Однако при более детальном изучении этой гипотезы, оказалось, что и она не способна объяснить механизм восприятия звуковых колебаний свыше 4000 Гц. Поэтому большим доверием у исследователей пользуется все-таки теория места, хотя она и не объясняет восприятия очень низких частот – ниже 100 Гц.

Обе теории имеют свои сильные и слабые стороны, поскольку какие-то процессы каждая из них объясняет лучше, какие-то хуже. Современная теория слухового восприятия высоты тона представляет собой сочетание теории места и временной теории. Это означает, что в основе восприятия высоты тона могут лежать два независимых друг от друга, но взаимосвязанных механизма, каждый из которых реализуется на ограниченном интервале частот. Например, кодирование высоких частот хорошо объясняется механизмом, лежащим в основе теории места, а кодирование низких частот – механизмом, лежащим в основе временной теории.

Исследования последних лет показали, что в периферической слуховой системе, кроме всего прочего, происходит сложный нелинейный процесс обработки и кодирования звуковой информации, который включает в себя не только кодирование частоты колебаний, но и формирование информации

о сложной временной структуре звукового сигнала. В частности, такие значимые для распознавания звуков данные, как длительности процессов нарастания и спада звука, характер его спектрально-временной огибающей и т. д.

Это позволяет утверждать, что в периферической слуховой системе происходит не только пространственно-временное кодирование, но и предварительный анализ всего акустического события в целом. Периферическая слуховая система выделяет несколько наиболее значимых признаков звукового сигнала и передает их в высшие отделы слуховой системы [3, 4, 13, 14].

2.2.2. Высшие отделы слуховой системы

Периферическая слуховая система заканчивается слуховым нервом, с помощью которого полученная в ее отделах информация передается высшие отделы в форме нервных импульсов. Начинается слуховой (кохлеарный) нерв от вершины улитки и проходит вдоль всей ее длины по спирали, собирая по пути к основанию все новые и новые волокна, отходящие от волосковых клеток, расположенных на поверхности базилярной мембраны. На выходе периферической части слуховой системы слуховой нерв принимает форму перекрученного пучка нервных волокон, при этом в центре него располагаются волокна, связанные с волосковыми клетками вершины улитки (ответственные за восприятие низких частот), а на периферии – волокна, связанные с волосковыми клетками, расположенными у ее основания (ответственные за восприятие высоких частот).

По мере перемещения слухового нерва от улитки до слуховых отделов головного мозга нервные волокна разветвляются, и их общее число увеличивается примерно с 30 тыс. до 10 млн. Однако каждое нервное волокно несет в себе информацию исключительно со своего вполне определенного участка базилярной мембраны, сохраняя таким образом пространственную картину распределения частот возбуждения вплоть до коры головного мозга (такое распределение информации принято называть «*топотопическим*»).

Первичные нервные волокна (нейроны первого порядка) поступают в так называемые *улитковые (кохлеарные) ядра*, находящиеся в коре височных долей мозга (рис. 2.8). Каждое кохлеарное ядро имеет два отдела: *дорзальный* и *вентральный*. Вентральный отдел, в свою очередь, делится волокнами входящего в него кохлеарного нерва на два подотдела: передний и задний. По существующим на сегодняшний день представлениям, клетки ядра обрабатывают полученную информацию в направлении улучшения частотной дискриминации двух сходных тонов и повышении чувствительности к частотной модуляции.

Далее слуховая информация передается нейронам второго порядка, с помощью которых она поступает в овальные ядра так называемого *верхнеоливного комплекса*, где происходит переkreщивание информации от разных ушей. Основная часть (более 60 %) нейронов от левого уха поступает в правое ядро и наоборот. Поскольку в овальные ядра поступают данные от обеих ушей, то здесь на основе анализа кросскорреляционных связей

происходит обработка бинауральной информации, т. е. реализуются такие свойства слуха, как пространственная локализация источника звука, бинауральная демаскировка и пр.

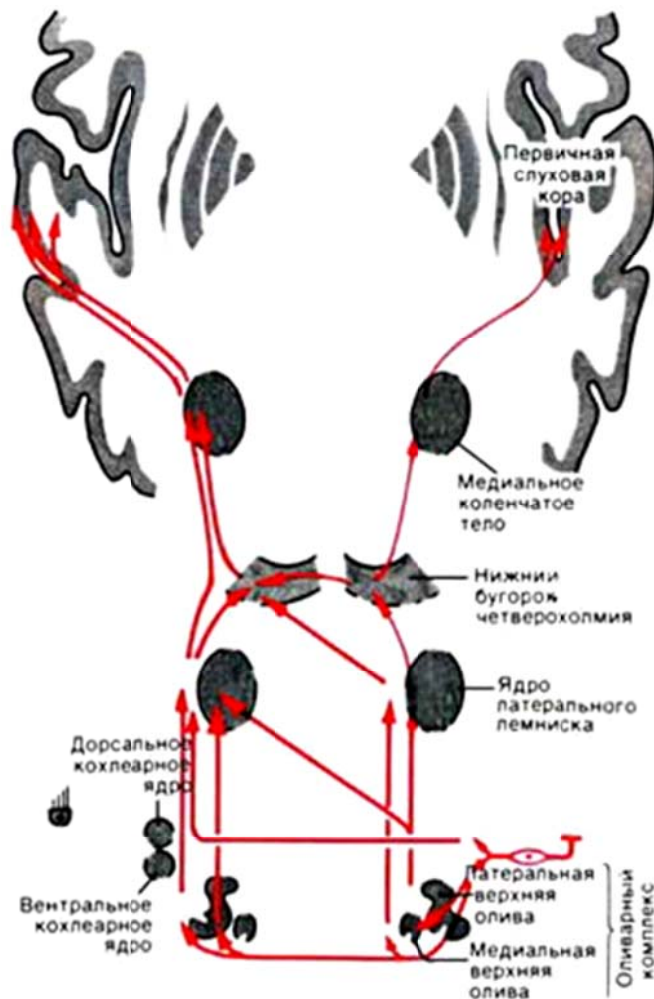


Рис. 2.8. Высшие отделы слуховой системы

Каждое овальное ядро передает свои сигналы к нижним бугоркам специальной пластинки в верхней части среднего мозга («крыше»), имеющую форму четверохолмия. Два верхних холмика «крыши» являются подкорковыми центрами зрительного анализатора, а нижние – центрами слухового анализатора. **Четверохолмие** – это рефлекторный центр различного рода движений, возникающих главным образом под влиянием зрительных и слуховых раздражений. В нижних бугорках четверохолмия нервные волокна снова частично перекрещиваются. Затем нейронные сигналы поступают в соединенные с нижними холмиками **медиальными коленчатыми телами** (части очень важной структуры мозга, обрабатывающей всю сенсорную информацию – **таламуса**). Оттуда они проецируются в слуховую кору обоих полушарий, расположенную в височной доле мозга.

Известно, что в левое полушарие специализируется на абстрактном мышлении, последовательной обработке информации и ее логическом анализе

(рационально-логическая функция), а правое – на конкретном образном мышлении, одновременной параллельной обработке разнообразной информации и интегральном анализе проблемы в целом (образно-творческая функция).

Левое полушарие контролирует вербальную информацию – речь, а также способности к чтению и письму. Оно также запоминает факты, имена и даты. Правое полушарие специализируется на обработке невербальной информации, которая выражается не в словах, а в символах и образах (рис. 2.9) [5, 7, 8, 15–17].

Левое полушарие отвечает за логику и анализ информации (аналитическое мышление). Именно оно анализирует все факты. Числа и математические символы также распознаются левым полушарием. Правое полушарие обеспечивает человеку способность мечтать и фантазировать. С помощью правого полушария мы можем сочинять различные истории. Правое полушарие также отвечает за музыкальное развитие личности и ее способности к изобразительному искусству.



Рис. 2.9. Межполушарная асимметрия головного мозга

Однако исследования последних лет показали, что такое разделение функций между правым и левым полушариями мозга хотя и существует, но является достаточно условным. По-настоящему сложная когнитивная обработка информации выполняется мозгом без жесткого разделения функций по соответствующим «департаментам».

Исследователи из Университета Южной Калифорнии (США) провели несколько экспериментов по определению степени участия полушарий мозга в выполнении различных заданий. Для участия в эксперименте были приглашены несколько студентов-архитекторов, у которых по характеру специализации визуально-творческая сторона личности должна быть особенно развита. Студентам показывали несколько предметов (например, восьмерку, букву «С» и круг) и просили в уме скомбинировать их так, чтобы получился новый объект. Например, лицо: его можно было сделать из перевернутой восьмерки на месте глаз, перевернутой «С» на месте рта и круга – там, где нос. Другим заданием было просто соединить геометрические фигуры. По контрасту с предыдущим для этого задания никакого воображения не требовалось. Одновременно за активностью мозга наблюдали с помощью ФМРТ-сканера.

***Примечание.** Функциональная магнито-резистивная томография (ФМРТ) используется для изучения анатомической структуры головного мозга. Позволяет визуально фиксировать степень активности различных областей головного мозга в процессе его функционирования.*

Как выяснилось в ходе эксперимента, правое полушарие действительно активно отзывалось на первое творческое задание. Но при этом оно просило помощи у левого, рационального. В творческой работе участие левого полушария было значительно бóльшим, чем при простом комбинировании предметов в уме (второе задание). Из чего исследователи сделали вывод, что если левое полушарие и не выступает на равных с правым в делах творческих, то уж точно оказывает ему значительную поддержку.

2.3. Разрешающая способность слуха

Оценка возможностей слуховой системы человека воспринимать звуковые сигналы, а также различать их по высоте и интенсивности является весьма важной задачей во многих областях человеческой деятельности. Из практики и проведенных исследований известно, что возможности нашего слуха очень велики, хотя и не до такой степени, как у некоторых представителей животного мира: многие из них способны слышать куда более слабые звуки и диапазон воспринимаемых частот у них гораздо шире. Некоторые физиологи считают, что человек на ранних стадиях своего развития тоже обладал более тонким слухом (а также более острым зрением и более тонким обонянием), но в процессе эволюции и под воздействием цивилизации эти органы чувств у него утратили былое значение и, как следствие, былую чувствительность.

В звукотехнике точное знание пределов возникновения слуховых ощущений играет чрезвычайно важную роль, поскольку определяет те ори-

ентиры, которые должны иметь в виду исследователи и разработчики звуковой аппаратуры в своей профессиональной деятельности.

Прежде всего, любая электронная система обработки, передачи или воспроизведения звукового сигнала вносит в него те или иные искажения. Поэтому задача разработчика состоит в том, чтобы эти искажения на выходе проектируемой им аппаратуры были заведомо меньше того уровня, когда они становятся заметными на слух.

Кроме того, современные цифровые системы передачи и записи информации имеют физические ограничения как по объему передаваемых в единицу времени данных, так и по емкости носителя. Естественное стремление передавать или записывать звуковые сигналы с как можно более высоким качеством приводит к еще большему увеличению объема информации, что входит в противоречие с ограниченной пропускной способностью каналов передачи и записи. Единственным выходом из создавшейся ситуации является скрупулезное изучение особенностей человеческого слуха и устранение из потока звуковых данных тех его частей, которые либо совсем не воспринимаются на слух, либо воспринимаются с большим трудом. Этимитовыми вопросами как раз и занимается психоакустика.

Пороги слуховых ощущений принято делить на две группы: абсолютные и дифференциальные.

Абсолютный слуховой порог – это то минимальное значение какого-либо из объективных параметров звукового сигнала (интенсивности, частоты, длительности и др.), при котором у человека возникает слуховое ощущение. Абсолютные слуховые пороги характеризуют чувствительность слухового аппарата к данному параметру: чем ниже слуховой порог, тем выше чувствительность [1–5, 9, 14, 18–20].

Дифференциальный слуховой порог – это минимальная разница в значении данного объективного параметра звука, которую человеческий слух способен обнаружить.

2.3.1. Абсолютные слуховые пороги

Абсолютные слуховые пороги определяются, прежде всего, по следующим объективным параметрам звукового сигнала: интенсивности (звуковому давлению), частоте и длительности.

АБСОЛЮТНЫЕ СЛУХОВЫЕ ПОРОГИ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ

Абсолютный слуховой порог по интенсивности очень сильно зависит от частоты звуковых колебаний, поэтому для его определения пользуются графиком, который наглядно показывает, как изменяется минимальное значение звукового давления, воспринимаемого человеческими органами слуха как звук, в зависимости от частоты акустических колебаний. Такой график называется **кривой абсолютного порога слышимости** (рис. 2.10).

Определяется он в полосе частот от 20 до 20 000 Гц – именно в этом диапазоне человеческий слух способен воспринимать акустические колебания как звук. Однако следует иметь в виду, что такая широкая полоса слышимых частот скорее физиологический предел возможностей человеческого слуха – в действительности подавляющее большинство людей даже в молодом возрасте (18–25 лет), когда острота слуха наивысшая, способны слышать звуки только в диапазоне 30–35...16 000–18 000 Гц. Тем не менее есть данные, что отдельные люди способны слышать звуки даже с частотой 22 000 Гц.

Порог слышимости – это минимальное значение звукового давления, при котором еще наблюдается слуховое ощущение. Он характеризует чувствительность слуха к интенсивности звуковой энергии.

Абсолютный порог слышимости принято выражать в децибелах по отношению к некоторой стандартной величине звукового давления $p_1 = 2 \times 10^{-5}$ Па (10^{-12} Вт/м²), которая условно принята за точку отсчета (0 дБ) при таких оценках. Как видно из рис. 2.10, наибольшей чувствительностью человеческий слух обладает на средних частотах – в диапазоне от 2000 до 5000 Гц. Здесь абсолютный порог слышимости даже меньше 2×10^{-5} Па ($\sim 1 \times 10^{-5}$ Па). Такая форма характеристики чувствительности слуха с уменьшением ее на краях диапазона слышимых частот определяется резонансными свойствами наружного и среднего уха. Резонансная частота слухового прохода находится в области частот от 3000 до 4000 Гц, барабанной перепонки – на частотах от 1200 до 1400 Гц, а системы слуховых косточек – в области частот от 2500 до 3000 Гц.

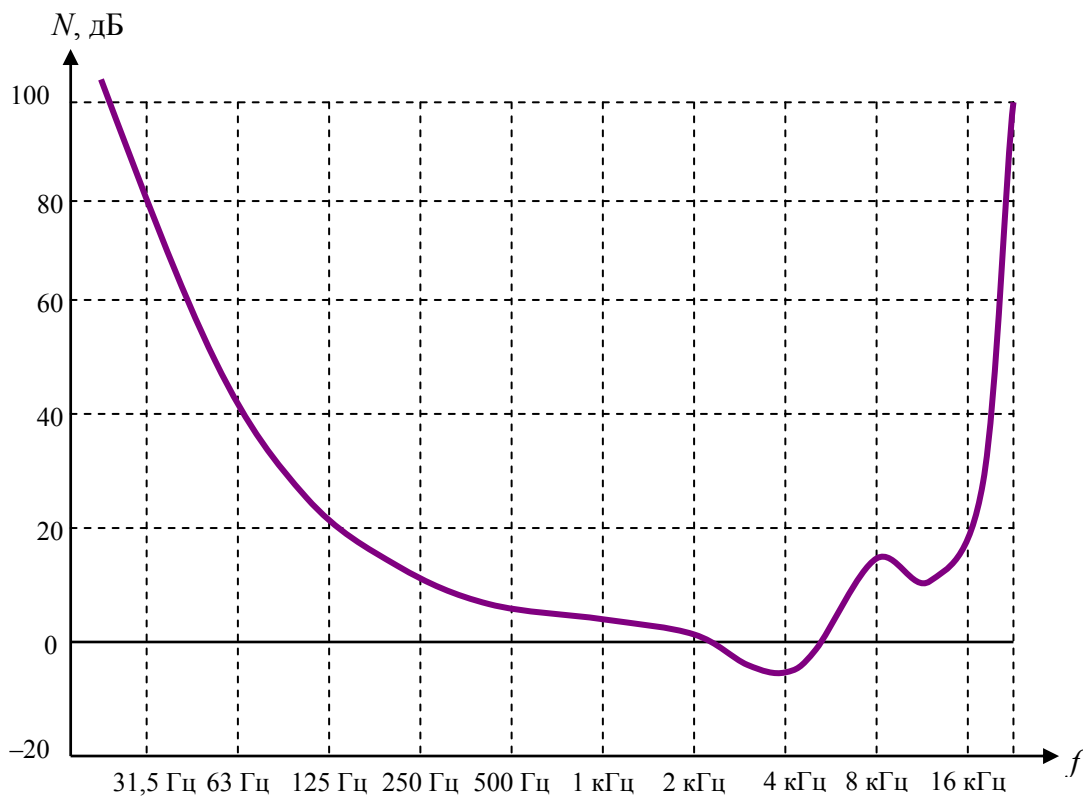


Рис. 2.10. Кривая абсолютного порога слышимости, построенная по результатам измерений в условиях свободного поля

Для наглядной иллюстрации возможностей человеческого слуха можно заметить, что звуковое давление, возникающее вследствие броуновского движения молекул при температуре 25 °С, составляет 5×10^{-6} Па. То есть если бы чувствительность слуха была бы еще вдвое выше, мы бы слышали непрерывный шум флуктуаций молекул воздуха и шум тока крови в сосудах головы, что нагружало бы наше сознание ненужной информацией. Таким образом, чувствительность слуха находится на пределе биологической целесообразности. Разумные пороги слышимости сформировались, вероятно, в процессе эволюции.

С другой стороны, человек способен ощущать как звук акустические колебания с уровнем 120 дБ (звуковое давление $p_2 = 20$ Па). Таким образом, легко оценить динамический диапазон слуха: он составляет величину $p_2/p_1 = 10^6$ (т. е. самый громкий звук, воспринимаемый слухом, в 1 млн раз больше самого слабого). Другими словами, динамический диапазон слуховой системы человека составляет 120 дБ.

Следует отметить, что кривая абсолютного порога слышимости (в том числе и на рис. 2.10) является достаточно приближительной, поскольку ее значения зависят от условий прослушивания, характера испытательного сигнала и других причин. Кроме того, чувствительность слуха у разных людей даже одного возраста имеет достаточно большой разброс – примерно $\pm 10\%$, а с возрастом слуховые пороги возрастают – особенно в области высоких частот. Обычно на частоте 10 кГц чувствительность слуха у шестидесятилетнего человека на 20 дБ ниже, чем у двадцатилетнего.

Для определения абсолютного порога слышимости обычно используют результаты измерений, полученные на синусоидальном сигнале в условиях свободного поля (т. е. в заглушенной камере). В качестве испытуемых приглашают людей со здоровым слухом в возрасте 18–25 лет – как тренированных, так и обычных, не имеющих специальной подготовки. В качестве источника сигнала используют громкоговоритель, который размещают прямо перед слушателем. Испытания проводятся индивидуально с каждым экспертом. Испытуемый имеет возможность регулировать громкость звукового сигнала – то уменьшая ее до тех пор, пока звук перестает быть слышимым, то увеличивая до величины, когда звук вновь начинает ощущаться на слух. Такие испытания проводятся на различных частотах в пределах диапазона слышимости, и на каждой из частот отмечается граничный уровень. По результатам, полученным для каждого из испытуемых, затем рассчитываются среднестатистические величины.

Для того чтобы избавиться от неоднозначности, связанной с тем, что слуховые пороги у разных людей сугубо индивидуальны, их усредненные значения для некоторых частот были зафиксированы в международном стандарте ISO R-226-85 (табл. 2.1). Эти значения соответствуют результа-

там испытаний, проведенных в свободном поле при прослушивании звуковых сигналов через громкоговоритель, размещенный прямо перед слушателем на равном расстоянии от обоих его ушей. Следует отметить, что при перемещении источника звуковых сигналов по азимуту относительно центральной линии головы, абсолютные слуховые пороги будут изменяться за счет изменения характера резонансных явлений в ушных раковинах и дифракции звуковых волн вокруг головы. Возраст испытуемых 18–25 лет.

Таблица 2.1

Значения слуховых порогов в свободном поле

f , Гц	100	200	400	800	1000	2000	3150	5000	8000	12500
N , дБ	25,1	13,8	7,2	4,4	4,2	1,0	–3,6	–1,1	15,3	11,6

Слуховые пороги, снятые при моноауральном прослушивании (т. е. для каждого уха в отдельности), оказались примерно на 3 дБ выше, чем при бинауральном прослушивании (т. е. двумя ушами). Кроме того, слуховые пороги для правого и левого уха могут отличаться друг от друга [1–4, 9, 18].

Кривая абсолютного порога слышимости, снятая с помощью звуковых сигналов, подаваемых через головные телефоны, отличалась по форме от кривой, снятой при помощи громкоговорителя, и в среднем оказалась на 5–10 дБ выше. Этот факт говорит о том, что в стереотелефонах, когда ушная раковина прижата к голове и не влияет на величину звукового давления у барабанной перепонки, человек слышит немного хуже. Что, в свою очередь, можно считать косвенным доказательством того, что резонансные явления, возникающие в ушной раковине, обеспечивают человеку некоторое увеличение остроты слуха.

БОЛЕВОЙ ПОРОГ И ОБЛАСТЬ СЛЫШИМОСТИ

Ограничение слухового восприятия акустических колебаний существует и в области громких звуков. Если звуковое давление синусоидального акустического сигнала постепенно увеличивать, то при достижении его значения величины примерно в 10 Па ($N = 100$ дБ) у человека в органах слуха появляются неприятные ощущения. По этой причине такую величину звукового давления принято называть **порогом неприятного ощущения**.

Если увеличить звуковое давление до 60–80 Па ($N = 132$ дБ), то у человека возникает ощущение физического давления на уши – эта величина называется **порогом осязания**.

Если звуковое давление продолжать увеличивать и далее, то при его значении для синусоидальных сигналов 150–200 Па ($N = 140$ дБ) в ушах возникает боль и такое значение называется **болевым порогом**. Для шумовых сигналов со сплошным спектром болевой порог даже ниже и составляет 120 дБ.

Слуховая система человека по своей природе адаптирована для восприятия, в основном, тихих звуков и звуков средней интенсивности. Поэтому чересчур громкие звуки при достаточно длительном воздействии могут привести к необратимому изменению порогов слуха в сторону их повышения вплоть до полной глухоты. Степень повреждения слуха пропорциональна как величине интенсивности, так и времени воздействия громких звуков. После воздействия громких звуков острота слуха у человека снижается всегда – срабатывает естественный механизм адаптации слуховой системы. Однако если время воздействия и громкость звука были не слишком велики, то через некоторое время слуховые пороги восстанавливаются. Хотя процесс их восстановления может продолжаться до 16–20 часов. Такое явление принято называть *временным сдвигом порога слуховой чувствительности*, или «*постстимульным утомлением*». Сдвиг слухового порога начинает проявляться даже при относительно невысоких уровнях громкости – уже при уровне звукового давления всего лишь 75 дБ (громкий разговор, смех на расстоянии 1 м). Чем выше уровень звукового сигнала, тем сильнее сдвиг слухового порога. Величина сдвига порогов также пропорциональна логарифму времени воздействия громких звуков – длительное воздействие даже не очень громких звуков может, тем не менее, привести к достаточно существенному сдвигу слухового порога. Если время нахождения под воздействием громких звуков превышает допустимые нормы, то полного восстановления порогов слуховой чувствительности не происходит, острота слуха постепенно снижается и, в конце концов, все это может привести к полной глухоте, которая практически не поддается лечению. Замечено, что особенно опасны в этом отношении высокочастотные составляющие звуковых сигналов, поскольку они оказывают наибольшее влияние на сдвиг порога слуховой чувствительности.

АБСОЛЮТНЫЕ СЛУХОВЫЕ ПОРОГИ ПО ЧАСТОТЕ

Если на диаграмме, иллюстрирующей кривую абсолютного порога слышимости, построить еще и кривую болевого порога, то на самых низких и самых высоких частотах эти две кривые пересекутся (рис. 2.11). Другими словами, чтобы достичь здесь порога слышимости требуются настолько высокие уровни звукового давления, что они совпадут с болевыми порогами. Если же эти кривые продолжить еще дальше – за пределы точек пересечения, то пороги слышимости в этих областях окажутся выше, чем болевые пороги. Боль здесь будет появляться раньше, чем ощущение звука.

Координаты точек пересечения кривой абсолютного порога слышимости и кривой болевого порога на оси частот будут характеризовать верхнюю и нижнюю границы диапазона слышимых звуков. Если в качестве кривой абсолютного порога слышимости использовать кривую, соответствующую физиологическому пределу возможностей человеческого слуха, то нижняя координата диапазона слышимых частот будет равна 20 Гц, а

верхняя – 20 000 Гц. Поэтому принято считать, что в виде слуховых ощущений человеком воспринимаются только звуки, попадающие в диапазон частот 20–20 000 кГц. Однако не следует забывать о том, что это физиологический предел диапазона слышимости. В действительности же звук с частотой 20 кГц может услышать далеко не каждый человек, да и то – только в очень молодом возрасте. Большинство же людей способно слышать звуковые колебания с частотой не выше 16–18 кГц – в том же самом молодом возрасте. А по мере увеличения возраста чувствительность слуха к высоким частотам имеет тенденцию к снижению – в среднем верхняя граница слышимого диапазона смещается вниз за каждые 10 лет примерно на 1 кГц, а иногда даже и более того. По данным, полученным Г. Бекеша, особенно быстро верхняя частота слышимых звуков начинает уменьшаться после 40 лет – примерно на 80 Гц каждые последующие полгода. Причинами ухудшения передачи высокочастотных звуков являются возрастное утолщение барабанной перепонки и ухудшение подвижности в сочленениях трех слуховых косточек. Фактически к 60 годам верхняя частота слышимого диапазона, как правило, не превышает 10–12 кГц (рис. 2.11).

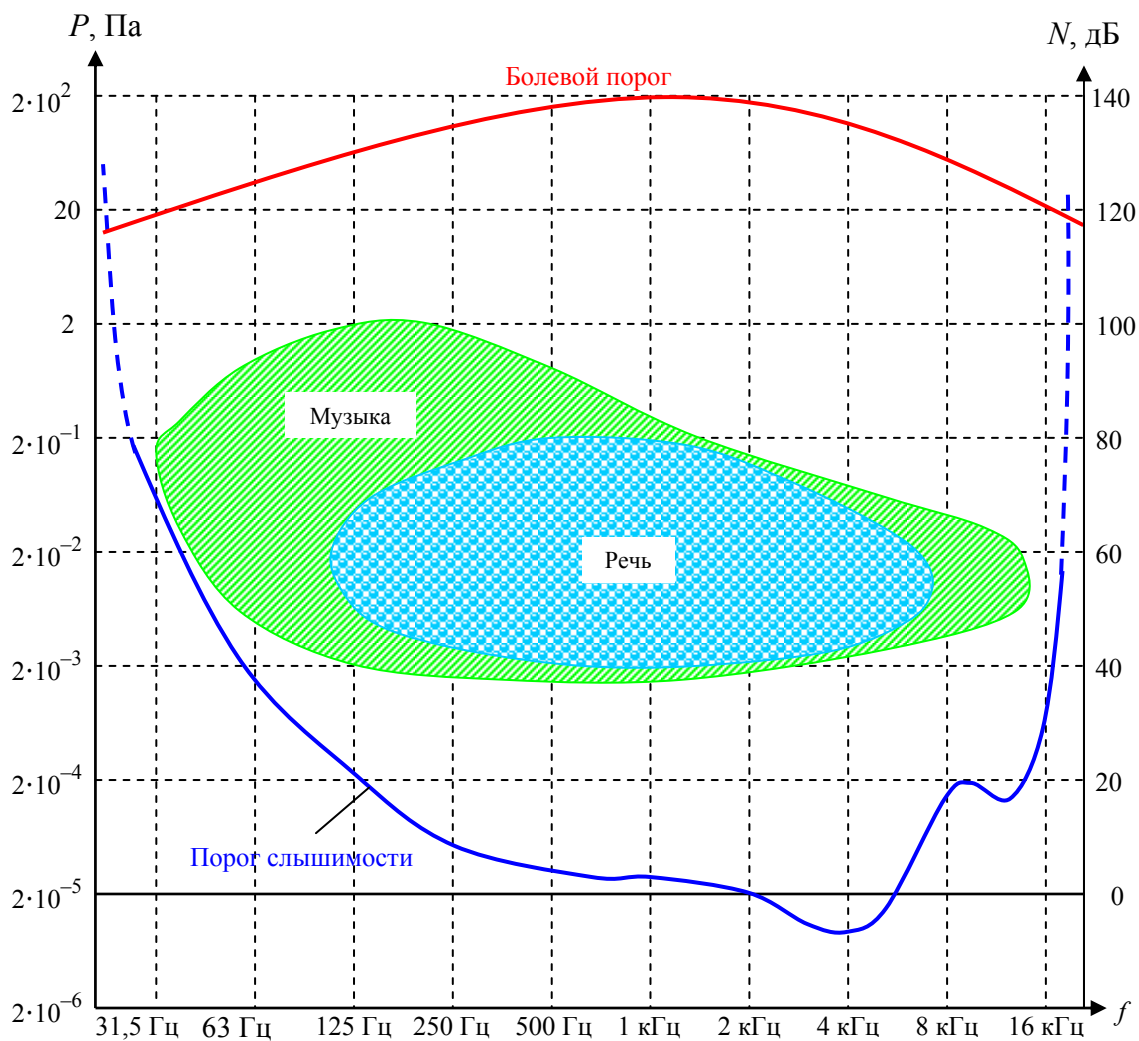


Рис. 2.11. Область слышимости звуковых сигналов, ограниченная по частоте и интенсивности

Как видно из рис. 2.11, область слышимых звуков располагается между кривыми абсолютного порога слышимости и болевого ощущения. Однако музыкальные и речевые сигналы занимают только часть слышимой области как по частоте, так и по амплитуде. Спектры речевых сигналов могут располагаться в диапазоне частот от 100 до 7000 Гц, а их уровни – в диапазоне от 40 до 80 дБ. Основная часть энергии музыкальных звуков сосредоточена в более широкой полосе частот – от 30 Гц до 15 кГц при уровнях громкости от 35 до 100 дБ. При этом именно как музыкальные звуки воспринимаются акустические колебания с частотами примерно до 10–12 кГц. Колебания более высоких частот воспринимаются как некое неопределенное звуковое ощущение, зависящее от индивидуальности слушателя и его возраста. Здесь следует отметить, что возрастное уменьшение верхнего порога слышимых частот приводит только к некоторому изменению тембров звучания музыкальных инструментов и уменьшению яркости их звучания из-за ослабления высокочастотных обертонов, но отнюдь не мешает воспринимать музыку и тем более речь. Проведенные эксперименты к тому же показали, что даже люди, почти не воспринимающие звуковые сигналы с частотами выше 12 кГц, очень легко распознают недостаток верхних частот в музыкальной программе. Кроме того, нормальный образованный человек хотя бы изредка посещающий филармонию с возрастом приобретает хороший музыкальный вкус и, слушая музыку, обращает внимание в основном на оттенки мелодии и нюансы ее исполнения, а не на изменение яркости звучания музыкальных инструментов, поэтому острота эмоционального восприятия произведения у такого слушателя, как ни странно, только увеличивается.

АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ НЕЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ

Несмотря на то, что органы слуха человека могут воспринимать как звук акустические колебания в диапазоне не шире 20–20 000 Гц, ощущать физически мы можем колебания и вне этого диапазона. Однако воздействие инфразвуковых и ультразвуковых колебаний на организм человека, особенно при высоких уровнях, может быть отнюдь не безопасным.

Чаще всего человеку приходится сталкиваться с инфразвуковыми колебаниями, поскольку их источником может быть различное мощное оборудование – тяжелые станки с низким числом оборотов, ходов или ударов, автомобильный, железнодорожный и водный транспорт, конвертерные и мартеновские цехи металлургических производств, компрессорные газоперекачивающих станций, портовые краны, котельные, вентиляционные системы (в том числе – в метро) и пр. Природными источниками инфразвуковых волн могут быть бури, ураганы, землетрясения, цунами.

Инфразвуковые колебания, формирующиеся при определенных условиях в зоне Бермудского треугольника, считают одной из возможных причин того, что там изредка находят «корабли-призраки», т. е. суда, экипаж которых мертв или полностью отсутствует. В этой зоне, по расчетам ученых, возможно образование самых опасных для человека стоячих волн с частотой 7 Гц, названных академиком В. В. Шулейкиным (*геофизик, специалист по физике моря*) «голосом моря». Если судно будет застигнуто инфразвуковой волной с частотой колебаний 7 Гц, то смерть всего экипажа наступит практически мгновенно. При частотах, отличных от 7 Гц в ту или иную сторону, у людей возникают беспричинные приступы безумия, в результате чего весь экипаж и пассажиры бросаются в океан и погибают.

Инфразвук как физическое явление подчиняется общим закономерностям, характерным для звуковых волн, однако обладает целым рядом особенностей, обусловленных низкой частотой колебаний упругой среды:

- имеет во много раз большие амплитуды колебаний, чем акустические волны при равных мощностях источников звука;
- распространяется на большие расстояния от источника генерирования ввиду слабого поглощения его атмосферой;
- благодаря большой длине волны и явлению дифракции легко обходит преграды, задерживающие слышимые звуки, и проникает в помещения.
- способен вызывать резонансную вибрацию крупных объектов, отчего мощность колебаний многократно возрастает.

Такие особенности инфразвука затрудняют борьбу с ним, поскольку классические способы, применяемые для снижения шума – обработка звукопоглощающими материалами, звукоизоляция и удаление от источника колебаний в данном случае малоэффективны.

Известно, что каждый орган человека имеет свою резонансную частоту, и частоты эти лежат как раз в области инфразвуковых колебаний. Если воздействовать на человеческий организм достаточно мощными колебаниями на этих частотах, то последствия такого воздействия могут быть очень неприятными, а в некоторых случаях даже фатальными.

В области инфразвуковых частот лежат ритмы мозга, характерные для различных состояний умственной активности человека:

- альфа-ритм (6–13 Гц) – соответствует состоянию спокойного бодрствования, отдыха;
- бета-ритм (14–30 Гц) – соответствует состоянию активного бодрствования, активизируется при появлении какого-то нового неожиданного стимула, в ситуации обостренного внимания, при умственном напряжении, при эмоциональном возбуждении;
- дельта-ритм (0,5–3,5 Гц) – соответствует состоянию глубокого естественного сна. Возникает также в состоянии наркотического забытья, а также в состоянии комы. Может наблюдаться также при некоторых формах стресса и в процессе длительного умственного напряжения;

● тэта-ритм (4–8 Гц) – наиболее ярко тета-ритм выражен у детей (2–8 лет). Способствует глубокой релаксации головного мозга, памяти, более глубокому и быстрому усвоению информации, активизации потребности и способностей к индивидуальному творчеству. В естественном состоянии эти ритмы доминируют во время фазы быстрого сна, полудремы. Именно в этом диапазоне частот в головном мозге появляется достаточно энергии для усвоения больших объемов информации и быстрого размещения ее в долговременной памяти. При этом многократно усиливаются способности к обучению и ослабляется восприимчивость к воздействию стрессовых ситуаций.

Ритм сокращений сердца – 1–2 Гц (60–120 ударов в минуту).

Резонанс сердца как внутреннего органа – 4–6 Гц.

Резонанс брюшной полости – 4–8 Гц.

Резонанс желудка – 2–3 Гц.

Резонанс кишечника – 2–4 Гц.

Резонанс почек – 6–8 Гц.

Резонанс рук – 2–5 Гц.

Резонанс позвоночника – 6 Гц.

Резонанс глазных яблок – 19 Гц.

Другие внутренние органы также имеют резонансы в области инфразвуковых частот.

При воздействии инфразвука естественные ритмы работы мозга и других органов нарушаются. Наиболее опасным считается диапазон от 6 до 9 Гц. Особенно вблизи частоты 7 Гц, созвучной альфа-ритму природных колебаний мозга. Никакая умственная деятельность в этом случае становится невозможной. Звук малой интенсивности вызывает тошноту и звон в ушах, а также ухудшение зрения и безотчетный страх. Звук средней интенсивности расстраивает органы пищеварения и мозг, порождая паралич, общую слабость, а иногда слепоту. Упругий мощный инфразвук способен повредить, и даже полностью остановить сердце. Обычно неприятные ощущения начинаются с уровня 120 дБ, травмирующие – со 130 дБ. Инфразвук с частотой около 12 Гц мощностью в 85–110 дБ, приводит к приступам морской болезни и головокружению, а колебания частотой 15–18 Гц при той же интенсивности внушают чувства беспокойства, неуверенности и, наконец, панического страха.

В здравоохранении принято условное деление уровней инфразвуковых колебаний по характеру воздействия на организм человека на ряд зон риска:

- менее 90 дБ – зона неясного, трудно обнаруживаемого воздействия;
- 90–105 дБ – зона умеренного риска, особенно в сочетании с другими факторами;
- 100–120 дБ – зона выраженного прогрессивного риска;
- 123–134 дБ – зона высокого риска при периодических воздействиях;
- 140–145 дБ – зона высокого риска при кратковременном воздействии;

- 180–190 дБ – зона экстремального и даже смертельного воздействия.

По мнению ряда исследователей, мелодии и ритмы современной рок-музыки являются продолжением и развитием древних музыкальных традиций народов Африки. Громкие выкрики, сопровождаемые ритмичными ударами барабанов, используется африканскими шаманами в своих ритуальных действиях для того чтобы войти в экстатическое состояние, характеризующееся невероятной физической активностью, силой и выносливостью, а также для того, чтобы ввести членов племени в полубессознательное состояние и настроить их на выполнение желаемых действий – например на войну с соседями.

Использование ритмов в ритуальных обрядах – прерогатива не только африканских племен. Те же приемы используются и во многих других религиях. Бесконечные и кажущиеся бессмысленными повторы в магических заклинаниях и заговорах, шаманские танцы с ударами в бубен, длящиеся часами причитания верующих – все это, несмотря на различия религиозных воззрений, имеет одну цель – воздействовать на психику человека и физиологические функции его организма.

О воздействии ритма на организм человека некоторым музыкантам известно и они эту власть ритма над человеком умело используют в своей работе. Поп-группы, к примеру, знают, что ритмы, соответствующие частоте биения пульса, производят на человека наиболее сильное воздействие – не даром из концертных залов порой выносят девочек, впавших в каталепсию. Таким образом, воздействие хард-рока на слушателя объясняется вовсе не ее эстетическими достоинствами (в большинстве случаев несуществующими), а тем, что слушатель, как одна из разновидностей фауны и в полном соответствии с объективными законами физиологии, вводится в состояние, похожее на то, в которое входят члены первобытного племени во время ритуальных действий шамана. Такое воздействие объясняется наличием прерывистых пульсаций с большим содержанием инфранизких частот, а также в ритмах, способных влиять на функционирование различных органов. Если ритм кратен полутора ударам в секунду и сопровождается мощным давлением инфразвуковых частот, то способен вызвать у человека экстатическое состояние. При ритме же, равном двум ударам в секунду и на тех же частотах, слушающий впадает в танцевальный транс, который очень сходен наркотическому.

Существует мнение, что тяжелый рок вообще не следует относить к музыке. Это скорее психотропное средство, своего рода акустический наркотик. Можно даже провести определенные параллели между влиянием на человека наркотиков того или иного типа и определенными музыкальными ритмами. Все наркотические вещества можно разделить на три группы: опиаты, стимуляторы и галлюциногены.

Те, кто употребляет опиаты (героин, морфий, опий) не имеют склонности к быстрой энергичной музыке. Их музыкальный стиль – трип-хоп.

Они предпочитают поп-группы с усталыми, надломленными голосами, а их стиль – это подчеркнутая медлительность и черный цвет в одежде.

Принимающие стимуляторы (кокаин, фенамин, эфедрин, марихуану) предпочитают музыкальные стили джангл, хард-рок, транс, хаус.

Любители галлюциногенов (психоделики, ЛСД, мескалина, псилоцибина) еще в 60-е годы прошлого столетия создали свой стиль, который называется прогрессивный рок (Джимми Хендрикс) и психоделический рок. Подобная музыка позволяет им расслабляться и «отлетать» в неведомую даль.

Примечательно, что в нормальном состоянии многие наркоманы ненавидят «свою» музыку, она вызывает у них тревогу, страх, сильную депрессию... и непреодолимое желание принять очередную партию наркотиков.

В том же ряду стоит и собственно ритуальная музыка, например, песнопения кришнаитов, сопровождаемые громкими ритмичными ударами в бубен, «медитативная» музыка Сиоко Асахары – главы скандально известной религиозной секты «Аум Синрике», которая в свое время изо дня в день транслировалась российским радио на всю страну.

Однако влияние инфранизких частот на организм человека до сих пор полностью не изучено, хотя об особых свойствах звуков очень низкой частоты было известно еще в глубокой древности. По библейскому преданию, мощные стены древнего города Иерихона, который существовал на территории современной Иордании, рухнули от звуков труб еврейских завоевателей. Во все времена это рассматривалось как необъяснимое мистическое чудо. Однако при раскопках древнего города археолог Якоб Фелд обнаружил в окружающих город стенах много круглых отверстий. Он доказал, что отверстия эти были просверлены во время осады города. Вероятно, когда начался штурм, то от громкого крика осаждающих и низкого звучания множества больших труб стены города рассыпались. А виновником стал все тот же инфразвук.

В 1929 г. американскому физику Роберту Вуду режиссером британского театра «Лайрик» Джоном Болдерстоном было предложено подумать над тем, как во время спектакля вызвать у зрителей состояние тревоги и ощущение чего-то таинственного, чтобы спектакль получился эмоционально насыщенным. Недолго думая, Р. Вуд предложил использовать уже известный ему из ранних опытов низкочастотный звуковой эффект. Идея состояла в том, что очень низкая нота, почти неслышимая, но все же воспринимаемая человеческим организмом, поможет создать в театре атмосферу таинственности и произведет на зрителей необходимое впечатление. Задача была выполнена с помощью специально изготовленной для этого случая органной «сверхтрубы», которая была еще длиннее и толще, чем те, которые применяются в церковных органах. Результат превзошел все ожидания. На первой же репетиции при нажатии органистом на соответствующую клавишу все, кто присутствовал в этот момент на сцене и в зале, почувствовали беспричинный ужас. Стекла в канделябрах театра зазвенели, окна

задрезжали, а само здание театра начало дрожать. Даже лошади, стоявшие возле крыльца, проявляли сильное волнение. Люди, жившие по соседству с театром, позднее подтвердили, что и их в те минуты охватил беспричинный страх. Постановщик театра тут же решил прекратить опасный эксперимент.

Исследования в области инфразвуковых частот, как правило, проводились в каких-то узких специализированных направлениях. К примеру, в некоторых странах делались попытки создания инфразвукового оружия. Но в силу того, что инфразвуковые волны поражающих уровней могут распространяться на очень большие расстояния и одинаково воздействовать как на тех, против кого оружие направлено, так и на тех, кто его применяет, пока такие попытки успеха не имели. Хотя если такое оружие разместить на спутниках и применять из космоса, то при определенных условиях это может привести к желаемому эффекту.

Спецслужбами многих стран проводились исследования в направлении принудительного воздействия на сознание людей, и здесь определенные успехи достигнуты. Например, воздействуя по определенным методикам на бета- и тэта-ритмы головного мозга человека, можно вкладывать в его подсознание требуемую информацию, формировать его психологию, навязывать линию поведения, противоречащую не только здравому смыслу, но даже и инстинкту самосохранения. Можно даже программировать его на выполнение определенных действий и дальнейшее самоуничтожение. Легче всего поддаются такой обработке люди молодые, у которых еще не сформировалось стойких убеждений и индивидуальной линии поведения.

Следует помнить, что возможности манипуляций с сознанием и подсознанием человека огромны, и, не владея определенной техникой защиты, можно стать легкой добычей для различного рода манипуляторов.

Тем не менее инфразвуковые колебания – это не всегда вредно. Безусловно вредны только колебания очень большой мощности. При невысоких уровнях и в определенных условиях инфразвук можно использовать и для достижения положительного эффекта. Проводились эксперименты, когда помещение с жесткими стенами использовалось как четвертьволновой резонатор инфразвуковой волны с частотой 5,5 Гц. Человек, находящийся в разных местах такого помещения, будет находиться под влиянием различных по величине физических параметров распределенной в пространстве помещения акустической волны. С точки зрения биологии, контакт с разными раздражителями должен вызвать разную ответную реакцию органов и систем. Выяснилось, что в одной зоне такого помещения у человека падает работоспособность, снижается реакция на внешние раздражители, резко увеличивается активность симпатического звена регуляции сосудистой системы и развивается реакция гиперкоагуляции (повышенной свертываемости) крови. В то же самое время у людей, находящихся в противо-

положном конце помещения, умеренно, но статистически достоверно, растет работоспособность, уменьшается активность свертывающих систем крови и улучшаются показатели реакции на частоту световых мельканий. Данный опыт показал, что инфразвук, в зависимости от места нахождения подопытного объекта, может быть как небезопасен для здоровья, так и обладать положительным стимулирующим эффектом.

Колебания ультразвуковых частот достаточно высоких уровней также приводят к неприятным явлениям – таким как нагрев тканей, а при очень большой интенсивности даже могут вызвать так называемый «холодный ожог».

АБСОЛЮТНЫЕ СЛУХОВЫЕ ПОРОГИ ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Экспериментально установлено, что абсолютные пороги слышимости зависят от длительности предъявляемого сигнала. Если сигнал очень короткий, то его можно и не услышать, даже если его уровень значительно выше абсолютного порога на данной частоте. Например, при уменьшении длительности звукового сигнала с 200 до 20 мс на частоте 1000 Гц величина слухового порога возрастает примерно на 10 дБ. Установлено, что значения слуховых порогов отчетливо стабилизируются только когда длительность предъявляемого сигнала становится больше 250 мс. Оказалось, что слуховой аппарат человека инерционен и для того чтобы ощущение звука сформировалось ему необходимо накопить определенное количество энергии внутри временного окна длительностью примерно 200 мс. Поэтому если сигнал в несколько раз короче, то интенсивность его должна быть во столько же раз выше. Такое свойство слуховой системы называется *временной интеграцией* (или *суммацией*).

Тем не менее при достаточной интенсивности человек способен услышать звук продолжительностью всего одно-два колебания. Однако восприниматься такой короткий звук будет как сухой щелчок – слуховой аппарат человека не способен различить высоту тона такого короткого сигнала. Чтобы слух мог распознать высоту тона, требуется большее число колебаний. Для приблизительного определения диапазона частот, которому принадлежит предъявляемый сигнал, достаточно уже трех-четырех колебаний, а для более-менее точного определения высоты тона требуется 8–10 колебаний. Поэтому длина минимального фрагмента сигнала, который необходим для распознавания высоты тона, зависит от его частоты. Например, при частоте 1000 Гц минимальная длина фрагмента должна быть не менее 8–10 мс, при частоте 100 Гц – 80–100 мс. Инерционность слуха связана с механизмом возбуждения базилярной мембраны. Кратковременные звуковые всплески не способны вызвать резонанс мембраны на нужной частоте, следовательно, мозг не может получить информацию о высоте тона чересчур коротких звуков. Минимальное время, требуемое для распознавания высоты тона, зависит от частоты звукового сигнала, точнее – от длины волны звуковых колебаний. Чем выше частота звуковых колебаний, тем

меньше длина волны, тем быстрее «устанавливаются» колебания базилярной мембраны.

Следствием инерционности слухового аппарата является то, что при исчезновении звукового стимула слуховое ощущение сразу не пропадает, а уменьшается до нуля постепенно. Промежуток времени, в течение которого слуховое ощущение уменьшается по уровню громкости на 9–10 фон, называется *постоянной времени слуха*. Среднее значение постоянной времени равно 30–50 мс.

Под уровнем громкости данного звука понимается уровень звукового давления эталонного звука на частоте 1 кГц, равногромкого данному. Уровень громкости измеряется в специальных единицах, которые называются фонами.

2.3.2. Дифференциальные слуховые пороги

Дифференциальные слуховые пороги характеризуют способность слуховой системы обнаруживать и оценивать разницу в значении одного из основных параметров звукового сигнала – амплитуды, частоты или длительности. В зарубежной, а также в отечественной специальной литературе минимальная разница одного из этих параметров обозначается аббревиатурой JND (Just Noticeable Difference – едва заметная разница).

Знание дифференциальных порогов весьма важно для музыкантов и звукорежиссеров. Современные процедуры компьютерной обработки звуковых сигналов позволяют вносить в него какие угодно изменения, однако при этом нужно твердо знать возможности слуховой системы человека, в том числе – пределы ее разрешающей способности. Иначе усилия, потраченные на улучшение звука, могут оказаться бесполезными – человеческий слух такого украшения просто не заметит.

АМПЛИТУДНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЛУХОВЫЕ ПОРОГИ

Исследования амплитудных дифференциальных порогов проводились в разное время разными учеными [1–6, 9, 18, 19]. Для этого можно использовать два метода.

Один из методов состоит в том, что для эксперимента используются два синусоидальных сигнала одной и той же частоты, но разного уровня интенсивности (громкости). Сигналы попеременно предъявляются группе экспертов. Вначале интенсивность обоих сигналов устанавливается одинаковой, а затем уровень одного из сигналов постепенно увеличивают. Когда разница в уровнях становится таковой, что ее замечают 75 % слушателей, величина этой разницы принимается за дифференциальный слуховой порог на данной частоте. Такие же измерения, выполненные на разных частотах и при разных уровнях звукового сигнала, позволяют получить общую карти-

ну зависимости дифференциальных порогов слышимости JND от частоты и общей интенсивности звукового сигнала.

Другой метод состоит в том, что используется всего один сигнал, но этот сигнал модулируется по амплитуде. Как показали предварительные эксперименты, наибольшей чувствительностью к изменению амплитуды несущего сигнала человеческий слух обладает на частоте 4 Гц, поэтому в качестве модулирующей частоты в этом эксперименте используется частота 4 Гц. Глубина модуляции вначале устанавливается равной нулю, а затем постепенно увеличивается до тех пор, пока не становится заметной для 75 % слушателей. Подобные эксперименты, проведенные на разных частотах несущего колебания и при разных уровнях громкости, показали, что полученные результаты примерно совпадают с результатами, полученными с использованием первого метода.

Закономерности, установленные в ходе экспериментов, можно выразить в виде соответствующих диаграмм. К примеру, из рис. 2.12 видно, что дифференциальные пороги по амплитуде существенно зависят от частоты звукового сигнала: наименьшие значения получаются в области средних частот (500–4000 Гц), а на низких и высоких частотах они возрастают: например, при общем уровне 60 дБ JND для частоты 1000 Гц составляет 0,8 дБ, для частоты 8 кГц – 1,0 дБ, а для частоты 200 Гц – 1,3 дБ. Кроме того, они сильно зависят от общего уровня сигнала: чем он выше, тем меньшую разницу между сигналами можно заметить: JND на частоте 1000 Гц при общем уровне 40 дБ составляет 1,25 дБ, при уровне 80 дБ – 0,6 дБ. Это хорошо заметно на рис. 2.13, где показана зависимость порогового значения коэффициента модуляции $M_{гр}$ тонального сигнала с частотой 1 кГц, модулируемого по амплитуде частотой 4 Гц, от уровня несущей частоты N .

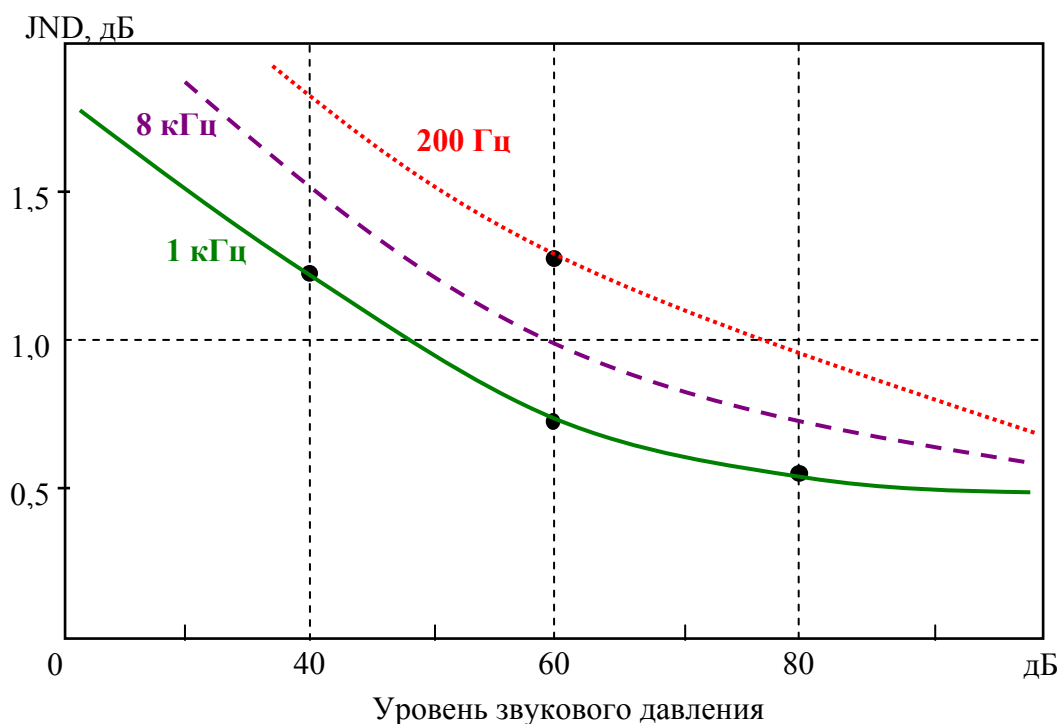


Рис. 2.12. Зависимость дифференциальных амплитудных слуховых порогов на частотах 200 Гц, 1 кГц и 8 кГц от уровня сигнала

Из рис. 2.13 видно, что при увеличении уровня несущего колебания чувствительность слуха к изменению амплитуды возрастает. При уровне звукового давления несущей $N = 20$ дБ коэффициент минимально заметной модуляции $M_{гр} = 10$ %. При повышении уровня звукового давления N до 100 дБ коэффициент $M_{гр}$ снижается до 1 %, т. е. в 10 раз, что говорит о том, что при высоких уровнях звукового давления чувствительность слуха к изменению амплитуды тонального сигнала значительно обостряется.

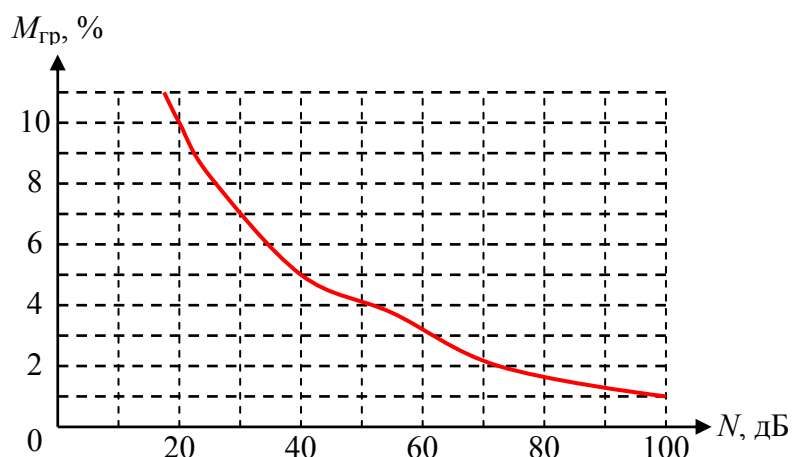


Рис. 2.13. Зависимость коэффициента $M_{гр}$ минимально заметной амплитудной модуляции тонального сигнала с частотой 1 кГц от его уровня N

Однако чистые тоны в повседневной жизни встречаются редко. Большинство звуков представляют собой созвучия и шумоподобные сигналы. Звуки, получаемые с помощью музыкальных инструментов, и гласные звуки речи – это созвучия, состоящие из основного колебания и целого ряда обертонов. Согласные и в особенности шипящие звуки по спектру ближе к шумам. Поэтому особенности слуха при восприятии шумовых сигналов также представляют значительный интерес для специалистов в области звукотехники.

Эксперименты показали, что восприятие амплитудной модуляции шумовых сигналов существенно отличается от восприятия амплитудной модуляции тональных сигналов.

На рис. 2.14 показана зависимость коэффициента $M_{гр}$ минимально заметной амплитудной модуляции при увеличении уровня N модулируемого сигнала, в качестве которого использовался широкополосный белый шум. Модуляции осуществлялась синусоидальным сигналом с частотой 4 Гц (сплошная линия) и прямоугольными импульсами со скважностью 2, следующими с той же частотой. Видно, что здесь коэффициент $M_{гр}$ уменьша-

ется с повышением уровня модулируемого шума только до значения уровня примерно 30 дБ, а затем, при его дальнейшем увеличении, остается практически неизменным и составляет в случае модуляции синусоидальным сигналом приблизительно 4 %, а в случае модуляции прямоугольными импульсами – около 2,5 %. Как и в эксперименте с модуляцией тонального сигнала, наилучшей чувствительностью к модуляции белого шума слух обладает при частоте модулирующего сигнала 4 Гц.

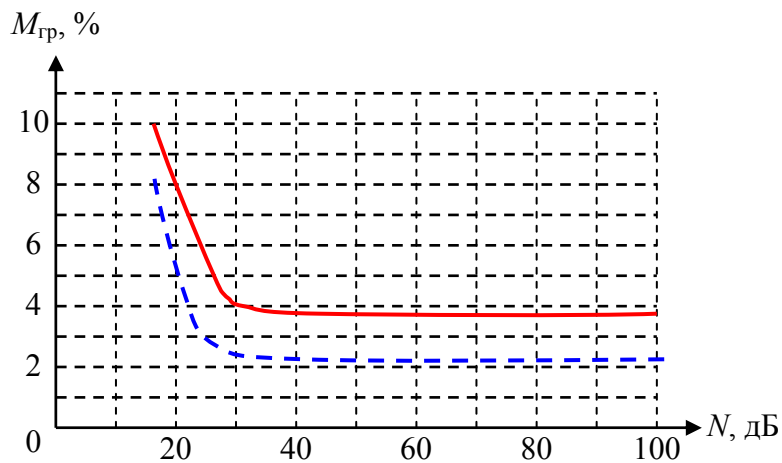


Рис. 2.14. Зависимость коэффициента $M_{гр}$ минимально заметной амплитудной модуляции белого шума синусоидальным модулирующим сигналом с частотой 4 кГц (сплошная линия) и прямоугольными импульсами с той же частотой (пунктирная линия) от уровня шума N

ЧАСТОТНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЛУХОВЫЕ ПОРОГИ

Частотная разрешающая способность слуха может быть определена с помощью методов, сходных с методами, которые использовались для определения разрешающей способности слуха по амплитуде.

В первом случае слушателям предъявляются два синусоидальных сигнала одинаковой интенсивности и одинаковой частоты, а затем просят изменять частоту одного из сигналов до тех пор, пока они не почувствуют разницу в высоте этих двух сигналов.

Во втором случае разрешающая способность по частоте определяется путем прослушивания частотно-модулированных сигналов – по минимально заметным на слух изменениям частоты. В качестве частоты модуляции здесь также используется частота 4 Гц.

Установлено, что частотная разрешающая способность человеческого слуха, также как и амплитудная, зависит и от частоты, и от интенсивности звукового сигнала.

На рис. 2.15 показано, как изменяется разрешающая способность слуха по частоте в зависимости от того, к какому диапазону частот принадлежит рассматриваемый сигнал. По оси абсцисс здесь отложена частота f исследуемого сигнала.

дуемого сигнала, по оси ординат – минимально различимое слухом изменение частоты этого сигнала $\Delta f/f$, где Δf – девиация частоты, т. е. отклонение ее от исходного значения в ту или иную сторону. Следует отметить, что при частотной модуляции тоном частота синусоидального сигнала изменяется от величины $f - \Delta f$ до величины $f + \Delta f$, т. е. амплитуда изменений частоты исследуемого сигнала составит $2\Delta f$. На рис. 2.15 представлены четыре кривые, соответствующие разным значениям уровня исследуемого тона.

Из рисунка видно, что в области низких частот – примерно до частоты 1 кГц, разрешающая способность слуха по частоте определяется почти одинаковым абсолютным значением изменения частоты тона, которое равно приблизительно 2–3 Гц, хотя в ряде случаев отмечалось значение всего в 1 Гц. В области более высоких частот (от 1 кГц и выше) отмечается постоянство относительного значения $\Delta f/f$, которое составляет здесь величину примерно равную 0,004 (дробь Вебера) [4, 9, 18]. Например, на частоте 5 кГц $\Delta f = 20$ Гц, на частоте 10 кГц $\Delta f = 40$ Гц и т. д.

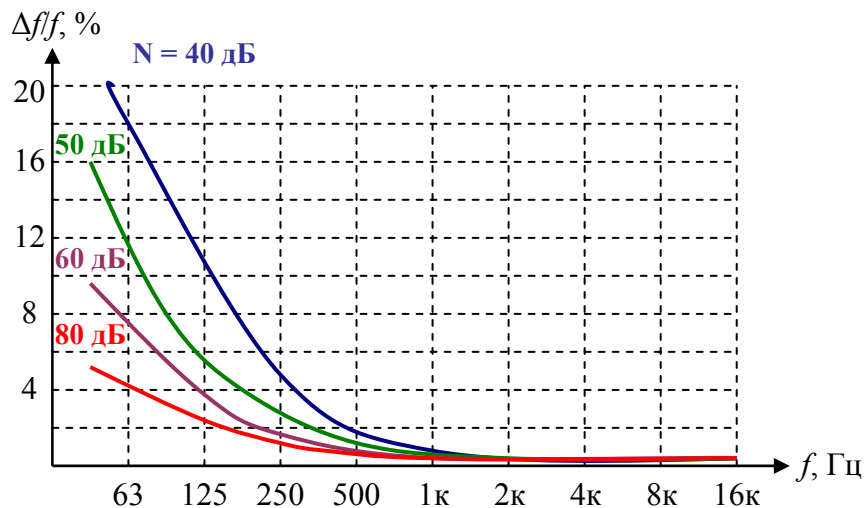


Рис. 2.15. Зависимость минимально различимой слухом разницы по частоте $\Delta f/f$ от частоты f звукового сигнала при различных значениях его уровня (40, 50, 60 и 80 дБ)

Из рис. 2.15 также видно, что уменьшение уровня рассматриваемого тона приводит к увеличению дифференциальных частотных порогов, т. е. чем тише звук, тем труднее его отличить по частоте от других звуков.

На рис. 2.16 показана зависимость порогового значения девиации частоты Δf от уровня N исследуемого звукового сигнала, в качестве которого использован тональный сигнал с частотой 1 кГц. Очевидно, что для сигналов малой интенсивности ($N < 30$ дБ) пороговое значение Δf велико: чем слабее сигнал – тем хуже разрешающая способность слуха по частоте. Однако при увеличении уровня сигнала более 30 дБ пороговое значение деви-

ации стабилизируется и в дальнейшем остается практически постоянным и равным примерно 2–3 Гц.

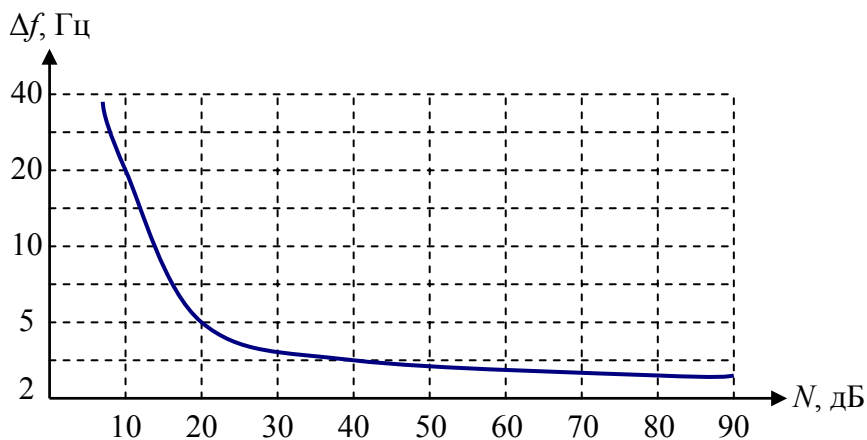


Рис. 2.16. Зависимость минимально различимой слухом девиации частоты Δf тонального звукового сигнала 1 кГц от его уровня N

ВРЕМЕННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОРОГИ

Органы чувств человека, и слух в том числе, являются по своей природе инерционными. Даже для приблизительной оценки характера и меры ощущения требуется некоторое время. Для точной же количественной оценки того или иного параметра ощущения времени требуется гораздо больше. Кроме того, разные параметры требуют для точной оценки разного времени. Поэтому исследования разрешающей способности слуховой системы во временной области проводятся в нескольких направлениях [1–4, 6, 9].

1) Анализ **минимального времени, в течение которого слух способен различить два сигнала**. Исследования в данной области показали, что минимальный интервал времени между двумя следующими друг за другом тональными сигналами, необходимый для того чтобы слух распознал их именно как два сигнала, а не один, составляет около 2 мс. Оказалось, что эта величина почти не зависит ни от частоты тонального сигнала, ни от его интенсивности. Однако для определения какой из двух сигналов поступает первым, а какой вторым (если это сигналы двух разных частот), необходимо время порядка 20 мс. Для определения высоты тона в области низких частот требуется примерно 60 мс, в области высоких частот – примерно 15 мс.

2) Анализ **дифференциальной чувствительности** к изменению длительности звукового сигнала. Здесь в ходе эксперимента испытуемым предлагалась последовательность групп из двух сигналов каждая – один сигнал из каждой пары имел длительности T мс, а другой несколько большую – $(T + \Delta T)$ мс. Сигналы подавались в случайном порядке и эксперт должен был определить, какой из двух сигналов в паре имеет большую длитель-

ность. Значения ΔT при этом изменялись от одной пары к другой в случайном порядке. Наименьшую разницу, правильно определенную экспертами в 75 % случаев, принимали за JND (дифференциальный порог) для длительности (ΔT).

В результате эксперимента оказалось, что по мере уменьшения общей длительности T воздействия сигнала ΔT также начинает уменьшаться, т. е., чем короче сигналы, тем меньшую разницу между ними способен заметить человеческий слух. Например, при длительности T сигнала вблизи 1 с пороговое значение ΔT составляет примерно 50 мс, а при длительности T сигнала 0,5 мс ΔT также составляет 0,5 мс. Дифференциальная временная чувствительность $\Delta T/T$ (дробь Вебера) здесь константой не является, а изменяется вместе с изменением длительности T таким образом, что при $T = 0,5-1$ мс она равна 1, при $T = 10$ мс – примерно 0,3 и при $T = 50-500$ мс – приблизительно 0,1. Полученные результаты при этом почти не зависят ни от высоты, ни от интенсивности звукового сигнала [9].

3) Анализ чувствительности слуха к изменению **времени установления (атаки) или спада звукового сигнала**. Время установления и время спада звука являются чрезвычайно важными характеристиками звучания различных музыкальных инструментов, поскольку изменяя эти параметры, можно до неузнаваемости изменить тембр звучания инструмента. Исследования показали, что дифференциальный порог для времени установления (как и для времени спада) составляет: для частот ниже 1 кГц – 1 мс, для частот 1–10 кГц – 0,5 мс. Если изменения времени атаки и спада звукового сигнала меньше, то для слуха они оказываются незаметными. В реальных условиях эти пороги могут оказаться даже большими, поскольку каждая отдельно взятая нота, как правило, в той или иной степени маскируется одновременно исполняемыми соседними звуками.

4) Анализ **дифференциальной слуховой чувствительности к фазовым искажениям**. Долгое время считалось, что человеческий слух не способен ощущать текущие изменения фазовых соотношений между спектральными компонентами в сложных звуковых сигналах. В этом вопросе ученые всего мира полагались на авторитетное утверждение Германа фон Гельмгольца – немецкого физика, физиолога и психолога, сделанное им еще в середине XIX в. Однако уже в 70-х гг. XX в., когда в исследованиях стали использовать компьютерную технику, выяснилось, что этот постулат не соответствует действительности. Изменения фазовых соотношений между спектральными составляющими сигнала способны очень существенно изменять его временную структуру, что, в свою очередь, выражается в изменении тембра звучания и четкости определения высоты музыкального сигнала. Выяснилось, что более всего слух чувствителен к скорости изменения фазы, т. е. к групповому времени задержки (ГВЗ):

$$\tau_{\text{гр}} = -d\varphi(\omega) / d\omega.$$

Установлено, что минимальный дифференциальный слуховой порог для искажений ГВЗ наблюдается на частоте 2 кГц и составляет ~ 1 мс (рис. 2.17).

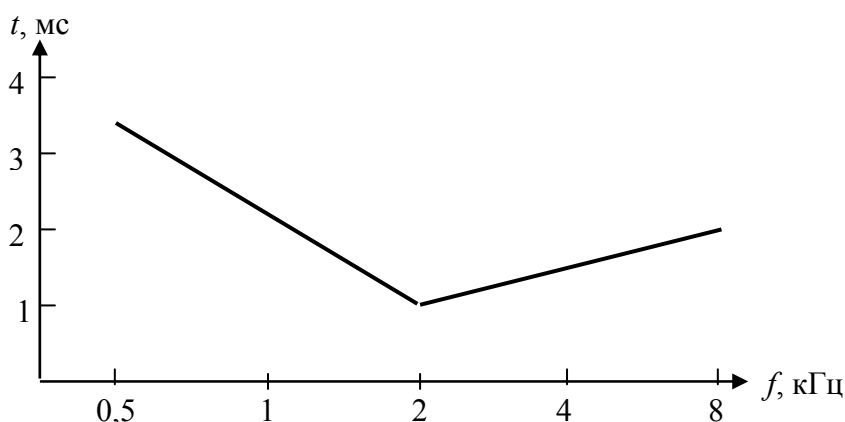


Рис. 2.17. Пороги слуховой чувствительности для ГВЗ

Знание дифференциальных слуховых порогов важно для проектирования звуковоспроизводящей и акустической аппаратуры, поскольку позволяет устанавливать искажения ниже порогов заметности человеческим слухом.

Следует, однако, заметить, что полной ясности в проблеме установления порогов чувствительности слуха к изменению временной структуры звукового сигнала пока еще нет. Поэтому исследования этого вопроса с использованием современных компьютерных технологий продолжают во многих научных учреждениях различных стран мира.

2.4. Типы звуковых сигналов

Восприятие звуковых сигналов существенно зависит от характера акустических колебаний, поэтому все звуки принято делить на несколько групп: *чистые тоны*, *созвучия*, *модулированные тоны* и *шумы* [21].

2.4.1. Чистые тоны

Звуковое давление чистого тона описывается синусоидальной функцией времени с постоянной амплитудой A , частотой $\Omega = 2\pi f$ и начальной фазой φ (рис. 2.18 и 2.19):

$$p_{\text{зв}}(t) = A \cos(\Omega t + \varphi). \quad (2.2)$$

Восприятие громкости тонов зависит в первую очередь от уровня акустических сигналов, но также и от частоты. Высота тона определяется в основном частотой колебаний.

Чистые тоны на практике встречаются редко. Примером источника чистого тона может служить камертон, который именно по этой причине и используется для настройки музыкальных инструментов.

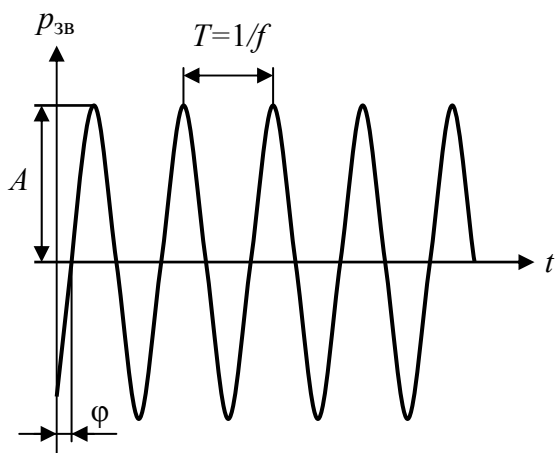


Рис. 2.18. Чистый тон

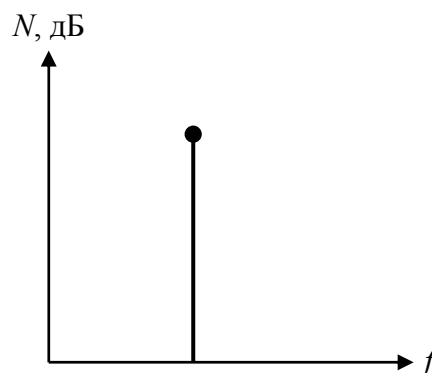


Рис. 2.19. Спектр чистого тона

2.4.2. Созвучия

Созвучием называют совокупность нескольких одновременно звучащих тонов разной высоты. Звучание большинства музыкальных инструментов – это именно созвучия, представляющие собой комбинацию основного тона и ряда обертонов, частоты которых кратны основному тону. Однако в звучании некоторых инструментов, к примеру – ударных, такой взаимосвязи между обертонами нет – спектр их звучания определяется конструкцией и материалом звучащего тела. Звуковое давление созвучия имеет несинусоидальную форму, а спектр его содержит множество составляющих (рис. 2.20). К созвучиям относятся гласные звуки речи.

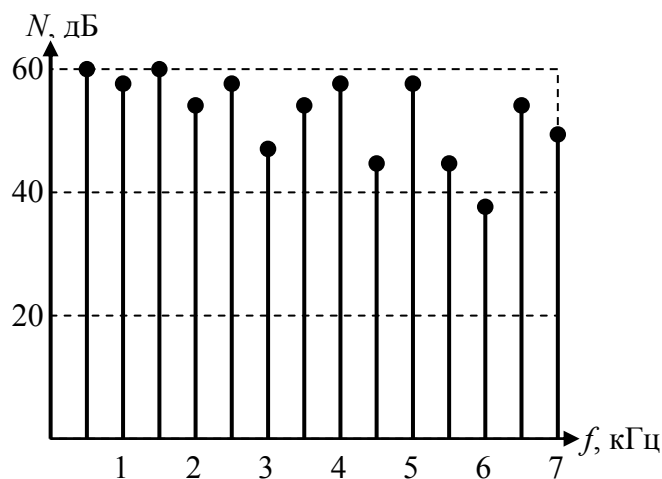


Рис. 2.20. Пример спектра созвучия

2.4.3. Модулированные тоны

Модулированные тоны – это звуковые сигналы, один или несколько параметров которых (амплитуда A , частота Ω или фаза φ – уравнение 2.2) изменяются по некоторому закону. Большинство звуков, которые мы слышим, являются тонами, модулированными либо по амплитуде, либо по частоте или фазе.

АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ ТОНЫ

Амплитудно-модулированные (АМ) тоны – это звуковые сигналы, амплитуда которых изменяется во времени. Звуковое давление сигналов, модулированных по амплитуде, описывается выражением

$$p_{зв}(t) = (A_1 + A_2 \cos \Omega t) \cos \omega t,$$

где A_1 и A_2 – амплитуды модулируемого и модулирующего тонов; $m = A_2/A_1$ – глубина модуляции; ω и Ω – круговые частоты несущего и модулирующего тонов. Если в качестве модулирующего сигнала выступает чистый тон, то спектр АМ-колебания состоит из трех составляющих (рис. 2.21).

Колебание с частотой ω определяет громкость и высоту звука, оно называется несущим колебанием. Два других боковых колебания, расположенные выше ($\omega + \Omega$) и ниже ($\omega - \Omega$) несущей частоты, определяют глубину и частоту изменений громкости тона. На высоту звука они влияют незначительно. Примером такого сигнала может служить свисток футбольного арбитра. Несущая у него составляет 1–2 кГц, модулирующая частота лежит в пределах 5–25 Гц. Модуляция хотя и периодическая, но не синусоидальная. Спектр боковых составляющих такого АМ-колебания не очень широкий (рис. 2.22). В музыке АМ-колебания используются для получения эффекта **амплитудного вибрато** или **тремоло**. Если глубина амплитудной модуляции достаточно велика, а частота модулирующего сигнала невысока – порядка 1–2 Гц, то на слух такой сигнал будет восприниматься как тон с изменяющейся громкостью.

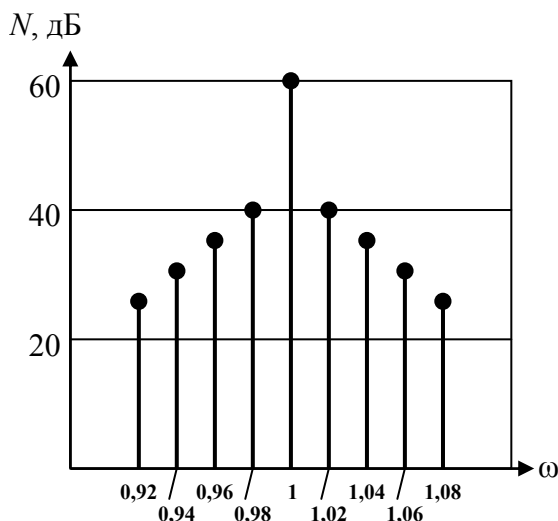
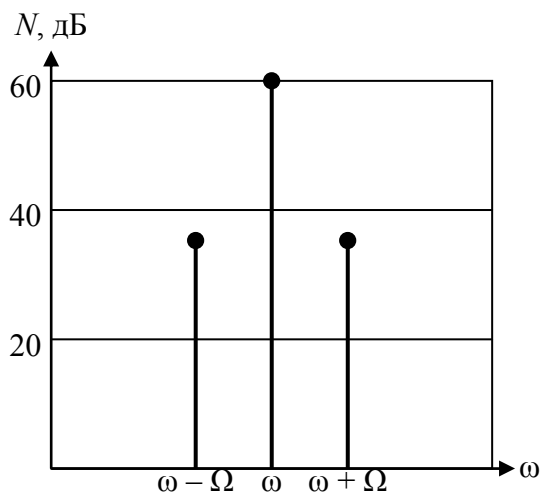


Рис. 2.21. Спектр АМ-колебания

Рис. 2.22. Спектр АМ-тона
(свистка арбитра)

ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ ТОНЫ

Частотная модуляция (ЧМ) характеризуется средней частотой (несущей) ω_0 , вокруг которой колеблются мгновенные значения частоты ω , модулирующей частотой Ω , и девиацией (отклонением от несущей) $\Delta\omega$. В этом случае имеем

$$p_{зв}(t) = A \cos \left[(\omega_0 t - (\Delta\omega / \Omega) \cos \Omega t) \right],$$

где A – амплитуда звукового давления; ω_0 – средняя частота, вокруг которой колеблются мгновенные значения частоты; $\Delta\omega$ – девиация несущей частоты; Ω – модулирующая частота; $\Delta\omega/\Omega$ – индекс частотной модуляции.

При малых индексах модуляции спектр ЧМ-колебания такой же, как у АМ-колебания. Чем больше индекс, тем больше боковых составляющих и тем шире спектр ЧМ-колебания. Он имеет дискретный характер. Частотный интервал между составляющими спектра ЧМ-колебания равен модулирующей частоте Ω . На рис. 2.23 приведен пример спектра ЧМ-колебания: несущая частота 1000 Гц, модулирующая частота 10 Гц, девиация частоты – 70 Гц. В этом случае индекс частотной модуляции равен 7, а наиболее значимые по уровню спектральные компоненты лежат в областях 900...1000 и 1000...1100 Гц.

В музыке примером частотно-модулированного колебания является эффект частотного *вibrato*.

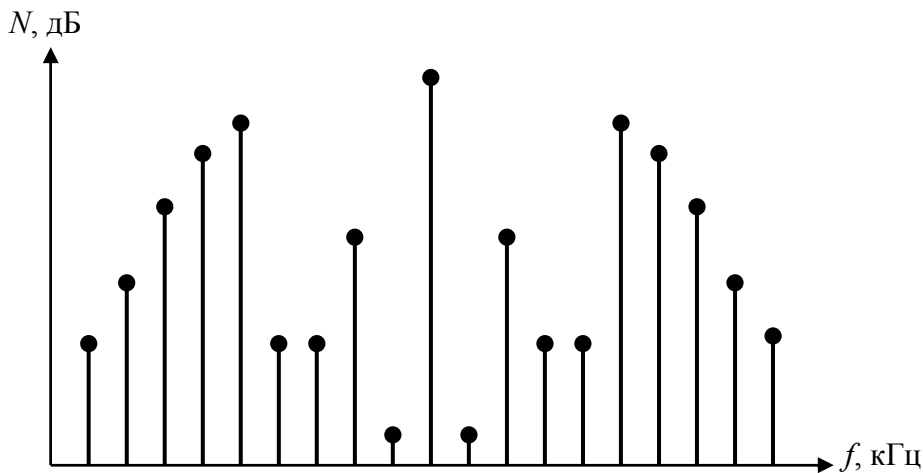


Рис. 2.23. Спектр ЧМ-колебания

БИЕНИЯ

Два одновременно звучащих тона с одинаковыми или почти одинаковыми амплитудами и близкими частотами, воспринимаются на слух как периодическое изменение громкости тона, поскольку при сложении таких колебаний амплитуда суммарного сигнала будет периодически изменяться от их суммы до их разницы. Такие звуковые сигналы называются *биениями*. Ча-

стота биений равна разности частот исходных сигналов (рис. 2.24). Биения возникают из-за того, что фаза сигнала с меньшей частотой постоянно отстает от фазы сигнала с более высокой частотой, при этом в те моменты времени, когда колебания происходят синфазно, амплитуда суммарного сигнала оказывается равной сумме амплитуд обоих сигналов, а в те моменты времени, когда эти два сигнала оказываются в противофазе – их разности.

Звуковое давление биений описывается уравнением

$$p_{зв}(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos(\omega_1 + \Omega)t,$$

где Ω очень мало.

Биения эквивалентны фазовой модуляции звукового сигнала $A \cos \omega_1 t$ с частотой Ω .

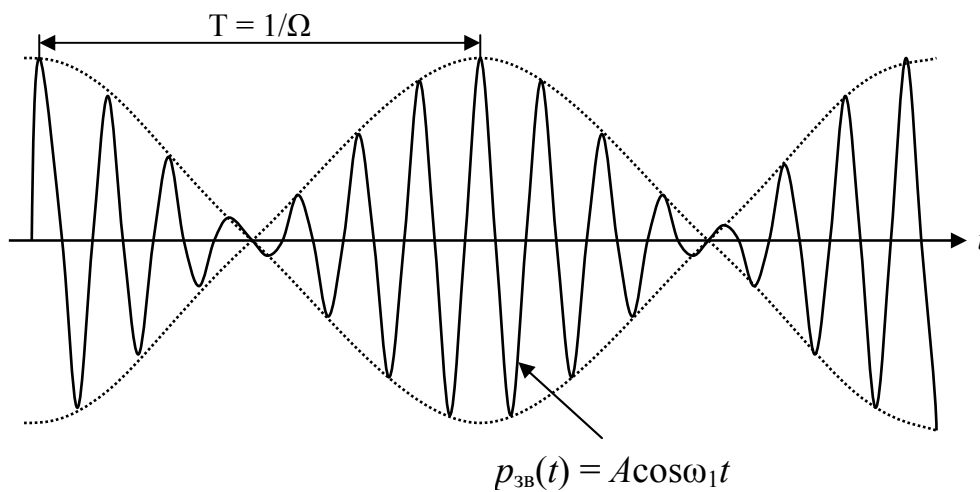


Рис. 2.24. Биения при $A_1 = A_2 = A$

Биениями пользуются при настройке струнных музыкальных инструментов с помощью камертона. Когда частота колебаний струны немного отличается от частоты колебаний камертона, то биения хорошо слышны. Струну подтягивают или ослабляют таким образом, чтобы частота биений уменьшалась. При точном совпадении частот колебания струны и камертона биения должны полностью исчезнуть.

Кроме того, биения используются в приборах для измерения частоты, емкости, индуктивности и пр.

2.4.4. Шумы

Звуки, спектр которых непрерывен на всей оси частот, называются шумами. В зависимости от характера огибающей спектральной плотности мощности шумы обозначают условными наименованиями, чаще всего связанными с определенными цветами: белый, розовый, красный, синий, серый

и т. д. Кроме того, в акустике рассматривается также производный от белого и розового шумов – равномерно маскирующий шум, о свойствах и назначении которого можно догадаться из его названия.

В зависимости от ширины спектра, шум может быть **широкополосным, узкополосным, октавным, полуоктавным, третьоктавным** и т. д.

Как следует из вышесказанного, важнейшей характеристикой шума является зависимость уровня спектральной плотности мощности шума $N_{ш}$ от частоты.

Белый шум. У данного шума спектральная плотность мощности $N_{БШ}$ равномерно распределена на всей оси частот. Например, узкополосный белый шум с полосой 20 Гц в диапазоне между 20 и 40 Гц будет иметь такую же мощность, что и шум в полосе между 3000 и 3020 Гц. Название свое получил по аналогии с белым светом, который содержит в себе электромагнитные волны всего видимого диапазона. В природе примером источника белого шума может служить шум близкого водопада. В природе и технике «чисто» белый шум (т. е. шум, имеющий одинаковую мощность на всех частотах диапазона) не встречается, поскольку такой сигнал должен бы обладать бесконечной мощностью. Тем не менее белым можно считать любой шум, спектральная плотность мощности которого примерно одинакова в некотором заданном диапазоне частот.

В линейной шкале частот график белого шума имеет вид прямой линии, параллельной оси частот (рис. 2.25, а). В октавной же шкале частот график спектра мощности этого шума приобретает вид наклонной прямой линии с подъемом в область высоких частот с крутизной 3 дБ/октаву (рис. 2.25, б).

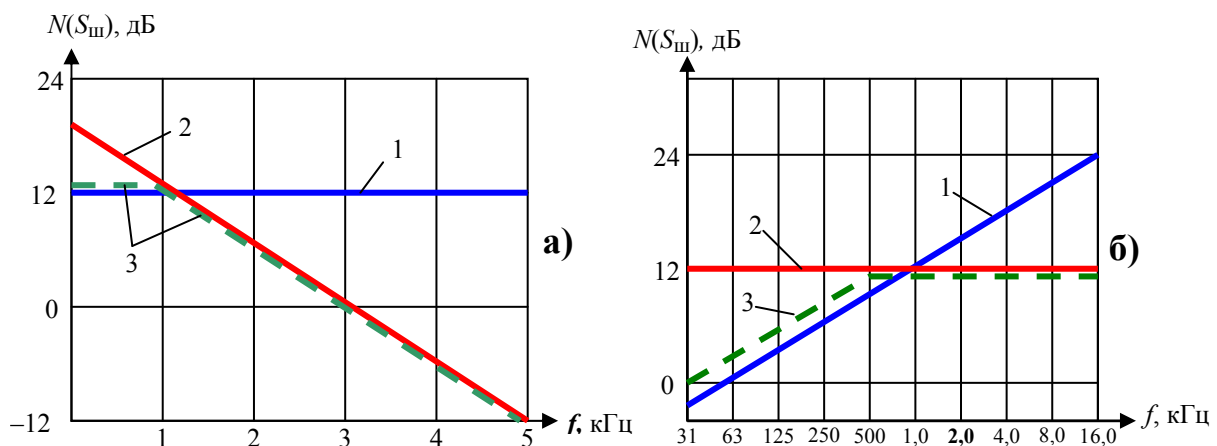


Рис. 2.25. Частотные зависимости спектральной плотности мощности шумов различного вида

а) – в линейной шкале частот; б) – в октавной (логарифмической) шкале частот;
1 – белый шум; 2 – розовый шум; 3 – равномерно маскирующий шум

Белый шум используется в электронной музыке как в качестве одного из инструментов музыкальной аранжировки, так и в качестве входного сигнала для специальных фильтров, с помощью которых формируются шумовые

сигналы других типов. Широко применяется в синтезаторах в качестве исходного сигнала для формирования звучания различных музыкальных инструментов, чаще всего – ударных, таких как, к примеру, тарелки.

Розовый шум. Это шум, спектральная плотность которого обратно пропорциональна частоте ($\sim 1/f$), т. е. в линейной шкале частот он является равномерно убывающим с крутизной 3 дБ/октаву (рис. 2.25, а). Например, мощность сигнала в полосе частот между 40 и 50 Гц равна мощности в полосе между 4000 и 5000 Гц. В октавной шкале спектральная плотность мощности этого шума НРШ не зависит от частоты, и ее график имеет вид прямой линии, параллельной оси частот (рис. 2.25, б). Розовым шум называется из-за того, что спектральная плотность мощности у него выше на низких частотах, которые в диапазоне видимого света соответствуют оттенкам красного. В природе примером источника розового шума, также как и белого, может служить шум водопада, но удаленного на достаточно большое расстояние. Поскольку высокие частоты при удалении от источника поглощаются гораздо сильнее чем низкие, то и уровень их с увеличением расстояния будет уменьшаться. Другой пример розового шума – звук пролетающего вертолета.

Равномерно маскирующий шум. До частоты 500 Гц этот шум обладает свойствами белого шума, а выше – свойствами розового (рис. 2.25). Свое название получил из-за того что обладает одинаковым маскирующим действием во всем диапазоне слышимых частот. Такой шум в природе не существует и формируется искусственно из белого шума с помощью специального фильтра, который на частотах выше 500 Гц имеет спад АЧХ с крутизной 3 дБ на октаву. Подобная форма характеристики объясняется размерами так называемых критических полос слуха (поскольку слух реагирует не на общую мощность шума, а на мощность шума в этих самых критических полосах), которые до 500 Гц имеют примерно одинаковую ширину, но с увеличением частоты свыше 500 Гц их размеры начинают постепенно увеличиваться.

Броуновский (красный, коричневый) шум. Броуновским этот вид шума назван по той причине, что может быть получен с помощью алгоритма, моделирующего броуновское движение частиц воздуха. Спектральная плотность этого шума пропорциональна $1/f^2$, т. е. с увеличением частоты спектральная плотность мощности его падает еще быстрее, чем у розового шума – с крутизной 6 дБ на октаву. Поэтому его еще называют красным шумом. Название «коричневый» – это результат неправильной трактовки англоязычного термина «броуновское движение» (а, следовательно, и броуновского шума), которое произошло от фамилии шотландского ученого Роберта Броуна (Brown), а вовсе не от английского названия коричневого цвета (brown). На слух красный шум воспринимается более приглушенным в сравнении с белым и даже розовым шумом.

Синий (голубой) шум. Синий шум – это вид шумового сигнала, у которого спектральная плотность мощности с ростом частоты увеличивается на 3 дБ на октаву. Спектр синего шума представляет собой зеркальное отражение спектра розового шума. Поскольку мощность его на высоких частотах увеличивается, то на слух он воспринимается как более резкий в сравнении с белым. Синий шум может быть получен путем дифференцирования розового шума.

Фиолетовый шум. Фиолетовый шум – это усиленный вариант синего шума – спектральная плотность мощности его пропорциональна квадрату частоты и с ее ростом увеличивается на 6 дБ на октаву. Спектр фиолетового шума представляет собой зеркальное отражение спектра красного шума.

Серый шум. Термином «серый шум» обозначается шумовой сигнал, который имеет одинаковую субъективную громкость для человеческого слуха во всем диапазоне воспринимаемых частот. Спектр серого шума можно получить путем сложения спектров броуновского и фиолетового шумов. В первом приближении он повторяет одну из изофон (рис. 2.26), поэтому человеческий слух субъективно воспринимает его равногромким по всему диапазону слышимых частот.

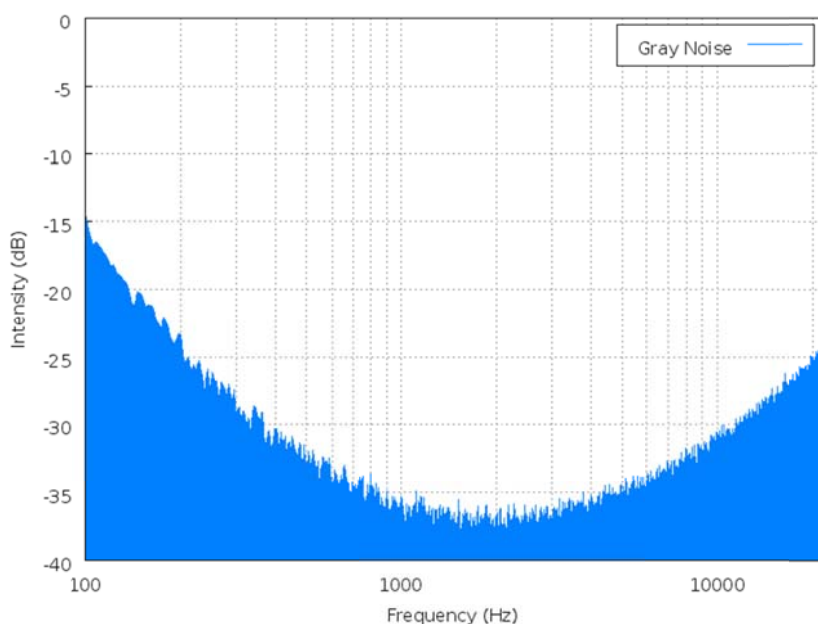


Рис. 2.26. Спектр серого шума

2.5. Громкость

Значение слова «громкость» знакомо каждому человеку – независимо от того, является ли он специалистом по акустике или нет. Даже ребенок знает, что источник звука, например голос рассказывающего о чем-то человека, звучит *громко* – когда его слышно хорошо и отчетливо, и *тихо* – когда

его слышно плохо и приходится прислушиваться, чтобы разобрать, о чем идет речь. Однако громкость по своей сущности – категория сугубо субъективная. Она характеризует только ощущение слушателя и поэтому ее нельзя измерить прямыми методами (с помощью приборов). Возможно, в будущем это удастся сделать с помощью компьютерных моделей слуховой системы, работа над которыми ведется сейчас в различных научно-исследовательских учреждениях. Тем не менее пока громкость считается субъективной характеристикой звука, и этот факт отражается в многочисленных ее определениях. Приведем одно из них.

Громкостью называется субъективное ощущение, позволяющее слуховой системе располагать звуки по определенной шкале – от звуков низкой интенсивности, квалифицируемых как «тихие», до звуков высокой интенсивности, квалифицируемых как «громкие» [2–4, 6, 9, 13, 14, 18, 20, 22].

2.5.1. Уровень громкости. Кривые равной громкости

Для того чтобы можно было как-то оценить количественно такую субъективную характеристику как громкость, т. е. придать ей характер объективного параметра, необходимо понять от каких объективных, т. е. измеряемых, характеристик звука она зависит. Очевидно, что, прежде всего, громкость зависит от такого физического параметра звука, как его *интенсивность*. Интенсивность, в свою очередь, зависит от звукового давления, создаваемого источником звука в точке прослушивания. Звуковое давление измерить можно, разместив в нужном месте измерительный микрофон.

Интенсивность I и звуковое давление p связаны соотношением:

$$I = \frac{p^2}{\rho C},$$

где ρ – плотность воздуха, равная $1,2 \text{ кг/м}^3$;

C – скорость распространения звуковых колебаний в воздухе, равная при температуре 20°C 343 м/с .

Из практики хорошо известно, что чем больший уровень звукового давления создает источник звука, тем громче он звучит. Однако одного только уровня звукового давления для характеристики громкости звучания недостаточно. Например, если создать три тональных звуковых сигнала с одним и тем же уровнем звукового давления $N = 40 \text{ дБ}$ – один с частотой 50 Гц , другой с частотой 100 Гц , третий с частотой 4 кГц и попытаться сравнить их громкости, то окажется, что сигнал с частотой 4 кГц будет звучать достаточно громко, сигнал с частотой 100 Гц – едва слышно, а вот сигнала с частотой 50 Гц не удастся услышать вовсе. Если обратиться к рис. 2.10, то причина будет ясна – сигнал с частотой 50 Гц при уровне звукового давления 40 дБ будет находиться ниже кривой абсолютного

порога слышимости, сигнал с частотой 100 Гц лишь немного выше нее, и только сигнал с частотой 4 кГц будет более чем на 40 дБ превышать абсолютный порог слышимости. Этот эксперимент доказывает, что громкость зависит не только от интенсивности звука, но и от его частоты. На краях диапазона слышимых частот можно сформировать звуковые сигналы очень высокой интенсивности, но никакого ощущения громкости при этом не возникнет, хотя слуховая система при этом может быть даже повреждена.

Кроме того, ощущение громкости зависит еще и от длительности звука – если звуковые сигналы будут слишком короткими (менее 35 мс), то будет слышен просто короткий щелчок, громкость которого зависит от длительности сигнала – чем короче сигнал, тем громкость его будет меньше.

Поскольку громкость звука – это его субъективная характеристика, то оценки ощущения громкости при изменении различных параметров звукового сигнала получают, разумеется, методом субъективных экспертиз. Такие экспертизы очень трудоемки и для накопления необходимого количества статистических данных требуют проведения большого количества экспериментов. Однако, как уже упоминалось выше, в будущем оценку громкости можно будет выполнять с помощью компьютерных моделей слуховой системы, работы над которыми сейчас активно ведутся во многих странах мира [1, 2, 6, 22].

2.5.2. Громкость тональных звуков

Построение шкалы звуков по громкости и исследование влияния на нее основных параметров звукового сигнала было выполнено, прежде всего, на тональных сигналах различной интенсивности, частоты и длительности. Для того чтобы устранить зависимость субъективно воспринимаемой громкости звука от частоты и обеспечить возможность количественной ее оценки, используют метод сравнения громкости исследуемого звука с громкостью некоторого эталонного звука. Для того чтобы такие оценки можно было сравнивать между собой, на международном уровне договорились использовать в качестве эталона громкость звукового сигнала с частотой 1000 Гц.

Определяется громкость следующим образом. На эталонной частоте 1000 Гц устанавливается некоторый вполне определенный уровень звукового давления, например 40 дБ. После этого эксперту предлагается прослушать сигнал на какой-то другой частоте, например 63 Гц, и отрегулировать его уровень таким образом, чтобы он казался равногромким эталонному. Значение уровня звукового давления эталонного сигнала в децибелах при этом квалифицируется как **уровень громкости** исследуемого сигнала и оценивается в специальных единицах, которые называются **фонами**.

Под уровнем громкости данного звука понимается уровень звукового давления эталонного звука на частоте 1000 Гц, равногромкого данному.

В приведенном примере уровень громкости звукового сигнала с частотой 63 Гц будет равен 40 фонам, хотя уровень звукового давления этого сигнала будет при этом значительно выше – более 60 дБ.

Если проделать тот же эксперимент на разных частотах в пределах диапазона слышимости, то получится ряд значений уровня звукового давления испытуемых сигналов, при которых эти сигналы имеют одинаковую громкость с эталонным сигналом 1000 Гц. Если отложить полученные значения на диаграмме (рис. 2.27) и соединить их кривой линией, то получим кривую равной громкости, которая называется *изофоной*.

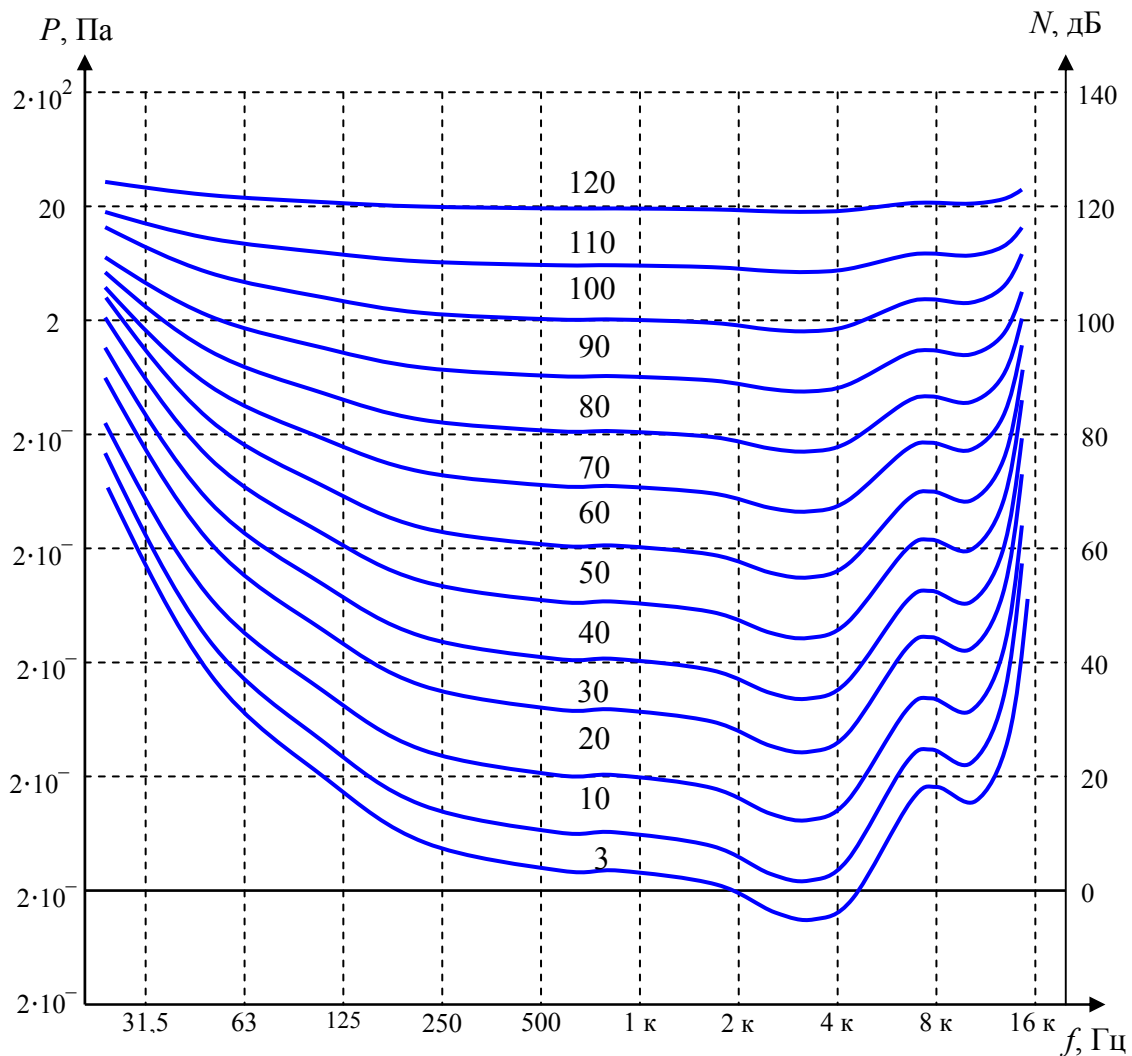


Рис. 2.27. Кривые равной громкости для различных значений уровня сигнала

Повторяя эксперимент при разных уровнях эталонного звука с шагом в 10 дБ, получим семейство кривых равной громкости, или изофон, которые показаны на рис. 2.27.

Звуковые сигналы могут предъявляться как через головные телефоны, так и через громкоговорители, однако, как отмечалось в разделе 2.3.1, изофоны при этом будут иметь разную форму.

Из рис. 2.27 видно, что при малых уровнях звукового давления оценка уровня громкости очень сильно зависит от частоты – кривизна изофон здесь максимальна и форма их повторяет форму кривой абсолютного порога слышимости, которая соответствует уровню громкости 3 фона. По мере увеличения звукового давления изофоны выравниваются, а подъемы на верхних и нижних частотах становятся менее крутыми, т. е. при больших уровнях низкие, средние и высокие звуки оцениваются по уровню громкости более равномерно.

Понимание механизмов ощущения громкости и ее зависимости от основных объективных параметров звукового сигнала имеет чрезвычайно важное значение для практики работы звукорежиссеров – так, например, если запись музыкального произведения и его прослушивание происходит на разных уровнях интенсивности, то ощущение баланса громкости и, следовательно, тембра звучания будет совершенно разным у звукорежиссера и у слушателя, что следует учитывать при записи и при воспроизведении.

Таким образом, звукорежиссеру следует помнить, что относительная громкость звуков разной частоты изменяется при изменении общего уровня записи. Естественный баланс по громкости сохраняется в ней только в том случае, если запись воспроизводится на том же уровне, который был во время записи оригинального источника. Если же запись воспроизводится при более низких уровнях, низкие и высокие частоты как бы пропадают, естественный баланс нарушается. Это одна из причин того, почему пение и речь кажутся бубнящими при воспроизведении на высоких уровнях через громкоговорители: слушатель воспринимает в них низкие частоты значительно более громкими, чем во время прослушивания естественного источника при более низких уровнях.

Свойство слуха по-разному оценивать частотный баланс при разных уровнях воспроизведения фонограммы учитывается разработчиками потребительской звуковоспроизводящей аппаратуры. В одних случаях регуляторы громкости в ней снабжаются цепями тонкомпенсации, которые автоматически изменяют частотную характеристику тракта звуковоспроизведения при регулировке уровня усиления. В других для этого предусматриваются ручные регуляторы уровня верхних и нижних частот. Такие меры позволяют если не исключить, то значительно уменьшить эффект пропадания высоких и низких частот при уменьшении уровня громкости.

Приблизительная громкость звуков в окружающем нас мире, приведена в табл. 2.2.

В музыке для характеристики громкости исполнения пользуются своей, профессиональной шкалой громкости (табл. 2.3).

Таблица 2.2

Уровни громкости различных звуков

Источник звука	Уровень громкости, фон
Шелест листвы	10–15
Тихий сад	20
Тихий шепот	20–25
Тихая жилая комната	25–30
Библиотека	25–30
Тиканье настенных часов	30
Приглушенный разговор	35
Обычный разговор	40–45
Звук в радиостудии при исполнении соло	40–50
Шумная комната в жилом помещении	40–50
Средний шум на улице	55–60
Шум аплодисментов	60–75
Громкие разговоры (на расстоянии в 1 м)	65–70
Крик, смех (на расстоянии в 1 м)	75
Шум на улице с интенсивным движением транспорта	75–80
Симфонический оркестр	80–100
Шум в поезде метро при движении	85–90
Шум вертолета	110
Отбойный молоток (1 м)	120
Взлетающий реактивный самолет	130–140

Таблица 2.3

Шкала музыкальных громкостей

Обозначение	Наименование	Уровень громкости, фон	Абсолютная громкость, сон
<i>fff</i>	Форте-фортиссимо – самое громкое	100	88
<i>ff</i>	Фортиссимо – очень громкое	90	38
<i>f</i>	Форте – громкое	80	17,1
<i>p</i>	Пиано – тихое	50	2,2
<i>pp</i>	Пианиссимо – очень тихое	40	0,98
<i>ppp</i>	Пиано-пианиссимо – очень тихое	30	0,36

Свойство слуха по-разному оценивать уровень громкости звукового сигнала в зависимости от его спектрального состава и распределения уровней звукового давления по частоте учитывается в приборах, предназначенных для измерения уровня шумов. В схемах таких приборов применяются взвешивающие корректирующие фильтры, амплитудно-частотные характеристики которых аналогичны соответствующим характеристикам слухового

аппарата человека. Взвешивающие фильтры ослабляют уровень низких частот в зависимости от общего уровня звукового сигнала приблизительно таким же образом, как это делает слуховая система.

Как правило, в таких фильтрах используются три вида взвешивающих кривых (рис. 2.28):

- кривая А со спадом -30 дБ на уровне 50 Гц по отношению к уровню на 1000 Гц;
- кривая В со спадом -12 дБ на частоте 50 Гц;
- кривая С со спадом -2 дБ на частоте 50 Гц.

Если эти кривые перевернуть «сверху вниз» (зеркально отразить относительно горизонтальной оси), и нанести на изофоны (рис. 2.28), то можно заметить, что кривая А примерно соответствует изофоне 30 фон. Таким образом, проводя измерения с использованием этой кривой (значения уровня сигнала выражаются при этом в дБ-А), мы как бы оцениваем уровень громкости этого сигнала так, как это делает слуховая система при слабых уровнях (30 дБ на 1000 Гц), кривая В (значения выражаются в дБ-В) соответствует средним уровням громкости (изофоне 70 фон), кривая С – (значения выражаются в дБ-С) соответствует высоким уровням громкости (изофона 100 фон).

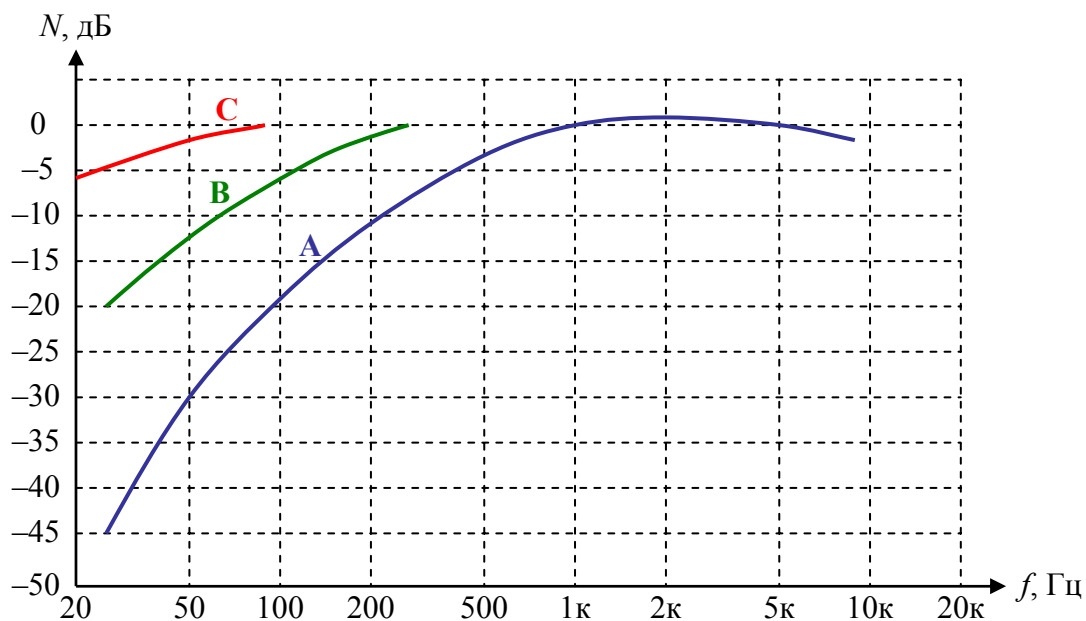


Рис. 2.28. Взвешивающие кривые А, В и С, используемые для измерения уровня шумов

Следует отметить, что шумомер по своему назначению точным измерителем уровня громкости не является. Он предназначен только для приблизительной оценки уровня громкости посторонних звуков в обследуемом помещении с учетом неодинаковой чувствительности человеческого слуха к восприятию различных частот. Слуховая система человека при оценке громкости сложных сигналов использует более сложные механизмы.

2.5.3. Относительная и абсолютная громкость

На практике нередко требуется оценить насколько один звук громче или тише другого. Оценка путем сравнения уровней громкости обоих сигналов в фонах в данном случае не подходит. Убедиться в этом несложно на простом примере. Например, известно, что уровень громкости, создаваемый шумом аплодисментов в концертном зале, составляет примерно 70 фон. Если каким-то образом умудриться удвоить число аплодирующих зрителей, то уровня в 140 дБ, характеризующего болевой порог, они все равно не создадут, как бы не старались. Приведенный пример наглядно иллюстрирует тот факт, что уровни, выраженные в децибелах или в производных от них единицах – фонах, складывать арифметически нельзя. По той же самой причине, если прослушать два звуковых сигнала с уровнями громкости 40 и 80 фон, то второй сигнал отнюдь не покажется нам громче другого в два раза. Все это доказывает, что связь уровня громкости с абсолютной оценкой громкости носит достаточно сложный характер.

Для того чтобы обеспечить возможность количественно оценивать **абсолютную громкость** звуковых сигналов, а также сравнивать их по громкости, была принята специальная единица – **сон**. Громкость эталонного звука в один сон – это громкость тонального звука с частотой 1000 Гц и с уровнем 40 дБ (1 сон = 40 фон).

Используя эталон абсолютной громкости, можно оценивать и **относительные значения уровня громкости** различных звуков, сравнивая их с громкостью эталонного звука. Для этого используется следующая методика. Эксперту предъявляются два звука – эталонный тон с частотой 1000 Гц и уровнем 40 дБ (т. е. громкостью в 1 сон) и звук той же частоты, громкость которого требуется оценить. Эксперту предлагается увеличивать уровень измеряемого звука до тех пор, пока его громкость по отношению к эталонному не возрастет в два раза. Поскольку громкость эталонного звука равна 1 сон, то громкость измеряемого звука с удвоенной громкостью принимается при этом равной 2 сонам. Оказывается, что это значение примерно соответствует уровню звукового давления всего в 50 дБ, а не в 80, как можно было бы ожидать, если попытаться использовать процедуру простого удвоения интенсивности исходного звука.

После этого громкость эталонного звука увеличивалась до полученного нового значения в 2 сона, и уровень измеряемого звука вновь увеличивался до двукратного увеличения его громкости. Этому уровню громкости присваивалось значение в 4 сона. Далее процедура повторялась и полученным значениям последовательно присваивались значения в 8 сон, 16 сон и т. д.

Во второй серии экспериментов, которая также начиналась с уровня 40 дБ для тона с частотой 1000 Гц, уровни громкости последовательно уменьшались в 2 раза и им присваивались значения 0,5 сон (соответствует уровню звукового давления 32 дБ или уровню громкости 32 фона), 0,25 сон и т. д.

Эксперимент показал, что на частоте 1000 Гц для уровней, превышающих 40 дБ, увеличение уровня, необходимое для удвоения громкости, остается примерно постоянным и составляет 10 дБ. При уменьшении уровня ниже значения в 40 дБ, разница в уровнях звукового давления, необходимая для уменьшения громкости в 2 раза (как видно из табл. 2.4 и из рис. 2.29) с каждым шагом уменьшается.

Таблица 2.4

Зависимость громкости звука от уровня громкости

Уровень громкости N , фон	100	90	80	70	60	50	40	32	25	19	14	11	9
Громкость G , сон	64	32	16	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64

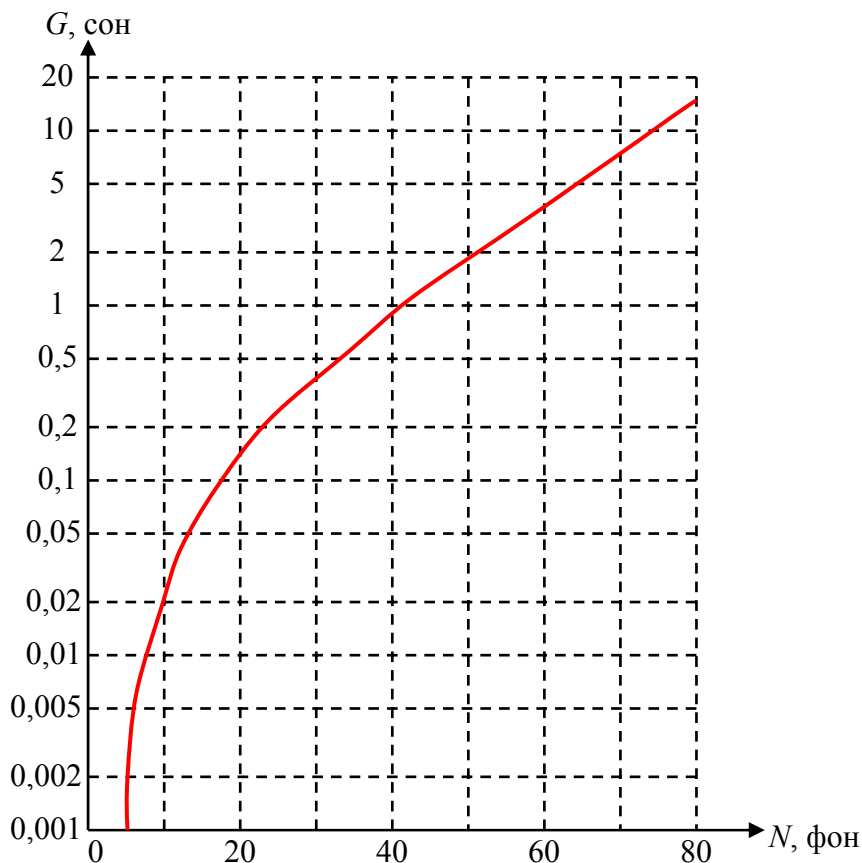


Рис. 2.29. Зависимость громкости G звука от уровня его громкости N

Аналитически зависимость воспринимаемой громкости звука G в сонах от его звукового давления p в паскалях (Па) можно выразить с помощью формулы

$$G = C \cdot p^{0,6},$$

где C – постоянная, которая зависит от частоты звукового сигнала [4, 20].

Кроме того, связь между абсолютным значением громкости G в сонах и значением уровня громкости N в фонах выражается формулой

$$G = 2^{\frac{N-40}{10}}.$$

2.6. Критические полосы слуха

Восприятие тональных сигналов является наиболее простым случаем для количественного анализа. Однако с тональными сигналами в повседневной жизни человеку приходится сталкиваться довольно редко. Реальные музыкальные и речевые сигналы представляют собой сложную смесь гармонических составляющих и шумовых компонент, механизм восприятия которых до сих пор до конца не изучен и является предметом исследований многочисленных специалистов в области психоакустики. Тем не менее уже известно, что при восприятии сложных звуковых сигналов слуховой аппарат человека разделяет их на частотные группы, которые называются критическими полосами. Анатомически им соответствуют различные участки базилярной мембраны шириной приблизительно 1,3 мм. Эта особенность слуха является одним из важнейших его свойств.

Критической полосой слуха называется полоса частот, в пределах которой человеческое ухо интегрирует энергию звукового сигнала и не различает тонкой структуры возбуждения.

Поясним это на конкретном примере. Пусть в некоторой полосе частот Δf_a содержится шум, интенсивность которого равна I , а спектральная плотность мощности S_a (рис. 2.30, а). Воспринимаемая громкость этого шума будет равна некоторой величине G_a . Если расширить полосу шума вдвое до величины $\Delta f_b = 2\Delta f_a$, а спектральную плотность мощности вдвое уменьшить до величины $S_b = 0,5 S_a$, с тем чтобы интенсивность шума I осталась неизменной, то воспринимаемая громкость его также останется неизменной $G_b = G_a$ (рис. 2.30, б). Дальнейшее расширение полосы шума вплоть до некоторой величины $\Delta f_c = \Delta f_{кр}$ при одновременном уменьшении во столько же раз спектральной плотности его мощности (S_c) также не приведет к увеличению воспринимаемой громкости $G_c = G_b = G_a$, при условии, что интенсивность

шума I останется постоянной (рис. 2.30, в). Однако если полоса шума превысит величину $\Delta f_{кр}$, то громкость сразу начнет увеличиваться: $G_e > G_d > G_c$, несмотря на то что интенсивность шума I по-прежнему останется той же самой. Величина $\Delta f_{кр}$ и будет характеризовать ту самую критическую полосу слуха, внутри которой распределение частотных составляющих звукового сигнала не влияет на восприятие громкости звукового сигнала. При этом спектральные составляющие этого сигнала могут располагаться в любом месте критической полосы – необязательно вблизи ее центральной частоты. В их числе могут быть как узкополосные шумы, так и гармонические составляющие. Сигнал может быть также одним единственным тоном, расположенным в произвольной точке критической полосы. Громкость в любом случае определяется только суммарной интенсивностью всех сигналов, которые находятся внутри критической полосы.

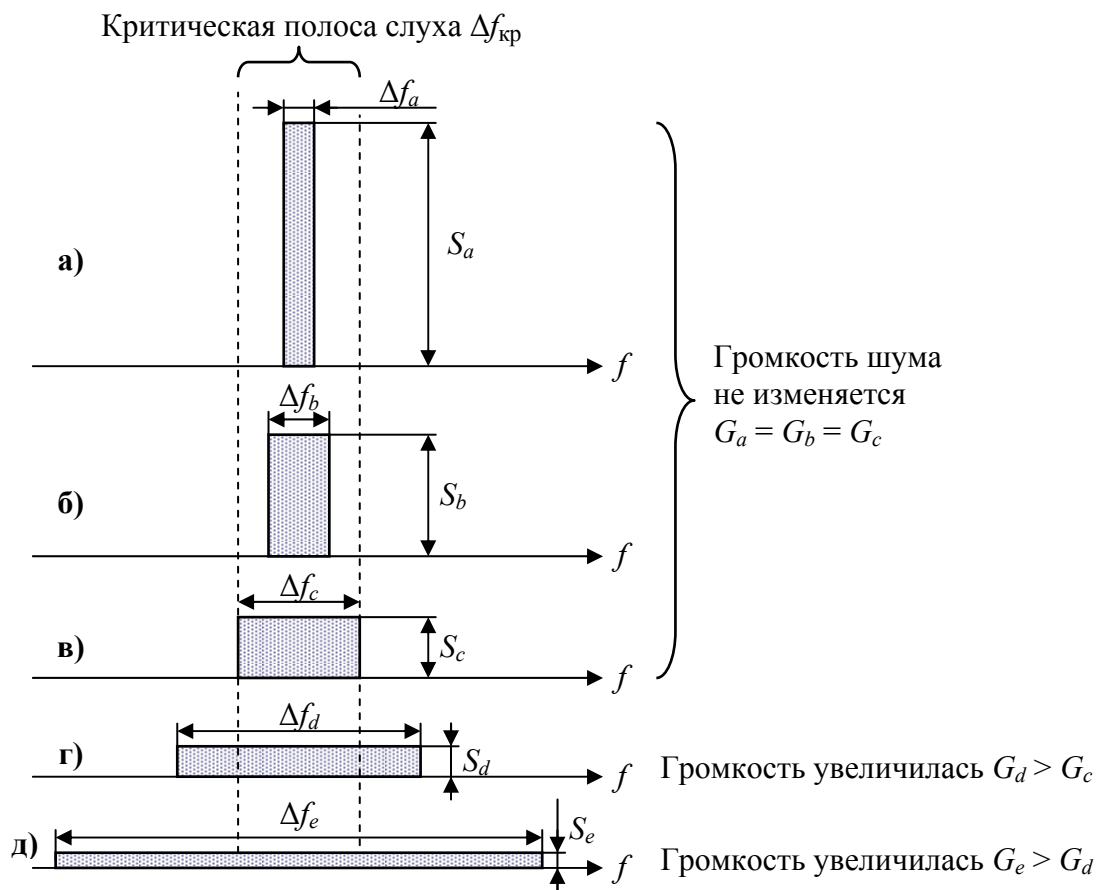


Рис. 2.30. К понятию «критическая полоса слуха»

Следствием такого интегрирования является случай, когда компоненты звукового сигнала (гармонические либо шумовые) внутри критической полосы очень слабы и уровни каждого из них в отдельности ниже порога слышимости, но благодаря их суммированию в слуховом аппарате они становятся заметными на слух как звуковое колебание некоей усредненной

частоты внутри критической полосы. Однако прямого отношения к звуко-высотной чувствительности частотные группы не имеют – в этом плане разрешающая способность слуха гораздо более высокая (человек с музыкальным слухом способен различать около 600 звуков различной высоты). Наличие же критических полос позволяет дифференцировать тембры звуков, коль скоро окраска адекватна спектральному акустическому составу. Индивидуальности в восприятии спектров объясняются как флуктуациями параметров критических полос у разных людей, так и влиянием резонаторов ушной полости, приводящих к индивидуальной для каждого человека частотной характеристике восприятия звуковых колебаний.

В диапазоне от 20 до 19 500 Гц число критических полос равно 24 (табл. 2.5). Ширина этих полос увеличивается от низких частот к высоким – от 80 Гц на низких частотах до 3,5 кГц на высоких (рис. 2.31).

Таблица 2.5

Критические полосы слуха

Номер критической полосы (частотной группы)	Средняя частота критической полосы $f_{\text{ср}}$, Гц	Верхняя граничная частота критической полосы, Гц	Ширина критической полосы, $\Delta f_{\text{кр}}$, Гц
1	50	100	80
2	150	200	100
3	250	300	100
4	350	400	100
5	450	510	110
6	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22	8500	9500	1800
23	10500	12000	2500
24	13500	15500	3500
25	19500	–	–

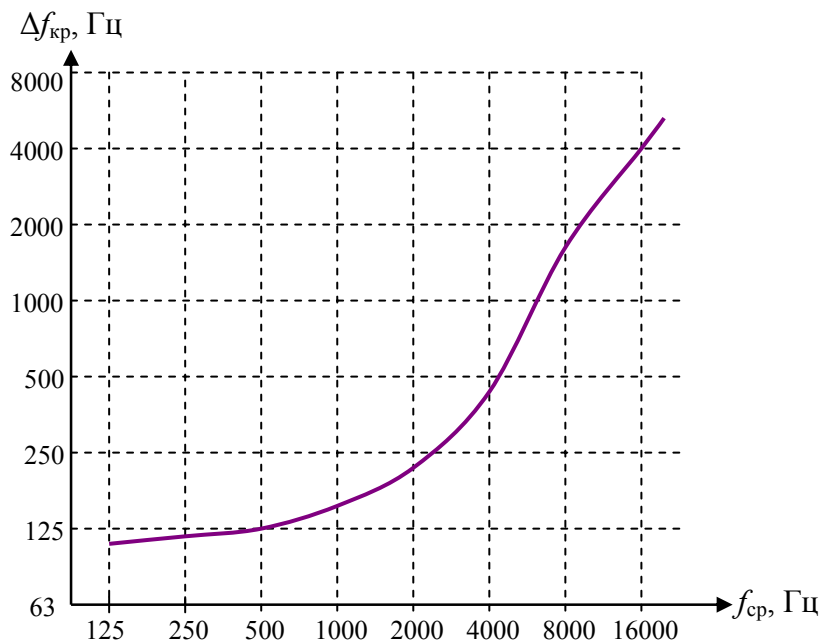


Рис. 2.31. Зависимость ширины критической полосы слуха от ее средней частоты

Предполагается, что сигналы отдельных частотных групп суммируются в слуховых отделах головного мозга, так что результирующее ощущение громкости тем выше, чем большее количество критических полос задействовано в восприятии звука. Это хорошо подтверждается умелой оркестровкой, когда для достижения максимальной звучности оркестра используется наибольшее число несовпадающих музыкальных регистров.

Другими словами, каждая отдельно взятая частотная группа имеет известный биологический предел, выше которого ощущение нарастания громкости уже не происходит [22]. С другой стороны, утомляемость слуха наступает гораздо быстрее, если узкополосный акустический спектр воспринимается только малой частью критических полос или вообще одной из них.

2.7. Маскировка звуковых сигналов

В реальной жизни нам довольно редко приходится иметь дело со звуками, которые возникают и существуют в полной тишине, т. е. при отсутствии других звуков. Чаще всего приходится прослушивать сразу несколько одновременно существующих звуковых сигналов, из которых интересен для нас может оказаться всего один – остальные будут только мешать восприятию желаемого. А если посторонние звуки являются достаточно громкими, то нужный звук можно и не слышать вовсе. Явление, когда при воздействии на органы слуха двух звуков один из них может не прослушиваться на фоне другого, называется *маскировкой*.

Маскировка возникает в результате взаимодействия звуковых сигналов, следствием которого является изменение порога слышимости одного из них (*маскируемого*) в присутствии другого (*маскирующего* или *маскера*).

Существует несколько видов маскировки, которые проявляются в зависимости от способа взаимодействия маскера и маскируемого сигнала и от характера каждого из них:

– одновременная или моноауральная маскировка, проявляющаяся в тех случаях, когда оба сигнала существуют в одно и то же время;

– временная маскировка, которая проявляется при неодновременном существовании маскера и маскируемого сигнала, либо когда маскер кратковременно накладывается на маскируемый звук;

– центральная или бинауральная маскировка, проявляющаяся, когда маскер и маскируемый сигнал воздействуют на разные уши слушателя;

– бинауральная демаскировка, позволяющая на фоне общего маскирующего шума расслышать интересующий слушателя источник звука.

Каждый звукорежиссер должен хорошо знать и уметь использовать явление маскировки при обработке звуковых сигналов. Физические принципы и закономерности маскирования лежат в основе технологий сжатия звуковых данных, используемых в стандартах MPEG, Dolby, ATRAC и пр. [1–6, 9, 18, 20, 23, 24].

2.7.1. Одновременная маскировка

При одновременной маскировке маскирующее действие звуков различного характера определяется путем вычисления разницы между порогом слышимости исследуемого звука в полной тишине (абсолютным порогом слышимости данного звука) и порогом слышимости того же звука при воздействии маскера (испытательного тона или узкополосного шума). Эта разница называется *степенью маскировки*.

Степень (или уровень) маскировки dN – это разница в децибелах между уровнем N_M порога слышимости тона заданной частоты в присутствии маскера и уровнем N_0 порога слышимости этого же тона в полной тишине:

$$dN = N_M - N_0. \quad (2.3)$$

Значения кривой абсолютного порога слышимости определяются как показано в разделе 2.3.1 (рис. 2.9). Значения порогов слышимости в присутствии маскера определяются путем добавления к основному (испытательному) тону дополнительного тона заданной частоты и интенсивности или узкополосного шума с известными параметрами.

МАСКИРОВКА ЧИСТЫМ ТОНОМ

На рис. 2.32 приведены кривые, отражающие результат маскирования испытательного тона, когда маскирующим сигналом также является тон, но с фиксированной частотой $f_M = 1$ кГц. Испытания проводились при разных

уровнях звукового давления N_M маскирующего тона в диапазоне слышимых частот. По этим кривым можно определить порог слышимости N_M маскируемого тона на заданных частотах f_T и по формуле 2.3 рассчитать степень его маскировки dN , дБ.

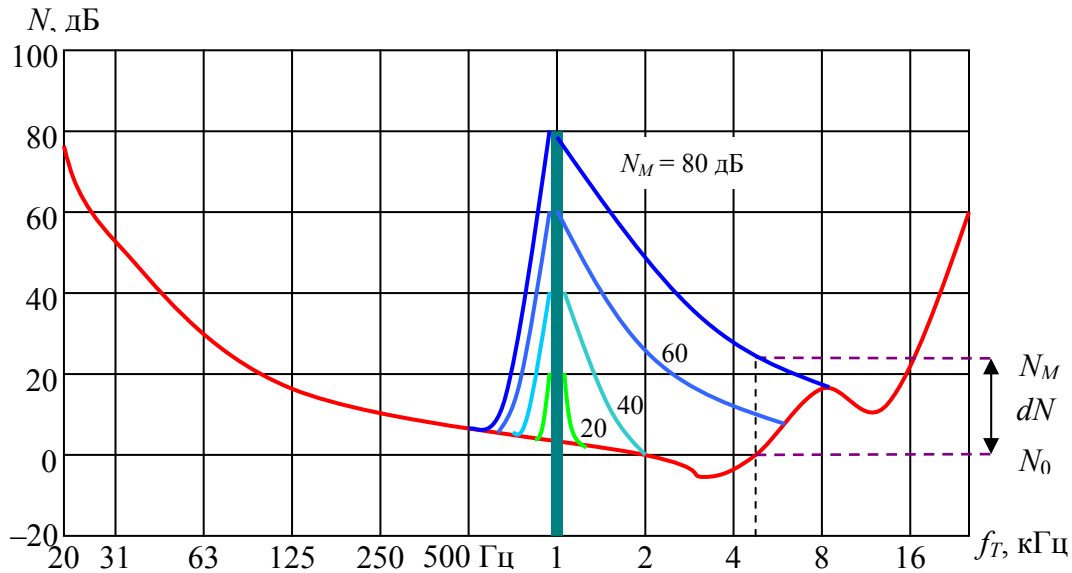


Рис. 2.32. Кривые порога слышимости испытательного тона с частотой f_T при маскировке его тоном с частотой $f_M = 1$ кГц

Анализ результатов, полученных при исследовании маскировки чистым тоном, позволил установить ряд закономерностей этого процесса.

1) Маскировка наиболее эффективна, когда частоты f_T и f_M близки друг к другу. Чем дальше по оси частот они располагаются, тем степень маскировки меньше.

2) Степень маскировки увеличивается по мере возрастания уровня маскирующего тона.

3) При высоких уровнях маскирующего сигнала кривые маскировки существенно несимметричны: спад в сторону низких частот более крутой, а в сторону высоких частот – более пологий. Поэтому при высоких уровнях маскирующего сигнала маскировка сильнее проявляется в области высоких частот. При уменьшении уровня маскирующего сигнала кривые маскирования становятся более симметричными.

4) Сдвиг маскирующего тона по частоте приводит к изменению формы кривой маскировки.

5) Высокочастотные маскирующие тоны эффективно маскируют звуки в относительно узком диапазоне частот, тогда как низкочастотные – в очень широком частотном диапазоне.

Другими словами, маскировка любого звука низкочастотными тонами значительно эффективнее, чем высокочастотными. Если, к примеру, два камертона 1200 и 440 Гц излучают звуки с одинаковой интенсивностью,

то первый тон будет не слышен, поскольку будет маскирован вторым тоном более низкой частоты. Если вибрацию второго камертона погасить, то звучание первого снова будет прослушиваться.

Если одновременно существуют два звуковых сигнала, каждый из которых имеет сложный спектр, то возникает эффект *взаимной маскировки*. При этом маскировка будет наиболее сильной в том случае, когда основная энергия обоих сигналов располагается в одном и том же диапазоне частот. Например, при передаче сложных вокально-инструментальных произведений из-за маскировки аккомпанементом партия солиста может стать невнятной и неразборчивой. По этой причине достижение четкости или, как принято говорить, «прозрачности» звучания при записи симфонических оркестров и эстрадных ансамблей является задачей весьма затруднительной, если звучание инструментов или отдельных групп инструментов приходится на один и тот же или на близкие регистры.

Звукорежиссеру при записи оркестра необходимо обращать внимание на эффекты маскировки и учитывать особенности этого явления. Еще на репетициях следует устанавливать баланс между силой звучания различных групп инструментов и вокалистов. Ясности основных мелодических линий и отдельных музыкальных партий можно добиться путем близкого расположения микрофонов к исполнителям, умышленным выделением наиболее важных в данный момент инструментов и другими специальными приемами звукорежиссуры.

МАСКИРОВКА ТОНОВ ШУМОВЫМИ СИГНАЛАМИ

Для того чтобы получить наиболее достоверную информацию о свойствах маскировки было бы естественным использовать в качестве маскируемого сигнала и маскера тональные сигналы. Однако при этом возникает ряд сложностей. Прежде всего, это биения, которые возникают когда маскер и маскируемый сигнал близки по частоте (разница между ними менее 15 Гц) и мешают правильно оценивать эффект маскировки. Кроме того, известно, что человеческий слух обладает существенной нелинейностью (подробнее об этом будет сказано в подразд. 2.8). Поэтому при воздействии на орган слуха достаточно громкого синусоидального звукового сигнала с частотой f_0 в процессе его обработки в слуховом аппарате возникают гармоники с частотами $2f_0$, $3f_0$ и т. д. Например, если прослушивать звуковой сигнал с частотой 500 Гц, то вместе с ним можно услышать и призвуки с частотой 1000 Гц, 1500 Гц и т. д. Поскольку путем объективных измерений параметров подводимого к акустическому излучателю сигнала можно легко убедиться, что в спектре воздействующего тона никаких посторонних гармоник нет, то они получили название «субъективных», т. е. возникающих в результате исключительно субъективного восприятия звуковых сигналов.

Подобные явления затрудняют точную количественную оценку эффектов маскировки. Поэтому во время проведения экспериментов по исследованию явлений маскировки в качестве маскера чаще всего используют шумовые сигналы. При этом узкополосный шум используют вместо тональных сигналов, в других, не менее содержательных исследованиях – широкополосный белый шум.

Эксперименты, проведенные с использованием в качестве маскера узкополосного шума, в целом подтвердили результаты, которые были получены ранее в ходе исследований с применением чистых тонов.

Наиболее интересным для практики является случай, когда в качестве маскирующего сигнала используется широкополосный белый шум. На рис. 2.33 приведены результаты исследований эффектов маскировки для этого случая. Сплошные кривые на графике соответствуют порогам слышимости при воздействии маскирующего шума различной интенсивности. Видно, что степень маскировки зависит здесь от интенсивности маскирующего шума почти прямо пропорционально: при увеличении интенсивности шума на 10 дБ порог слышимости также возрастает на 10 дБ.

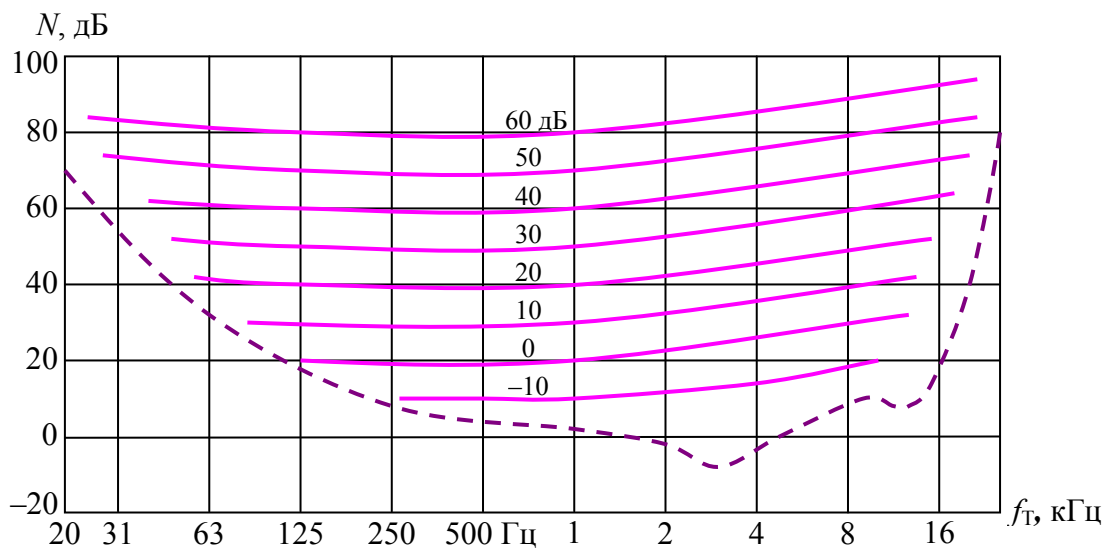


Рис. 2.33. Зависимость уровня маскировки от уровня интенсивности белого шума

Из рис. 2.33 также видно, что до частоты примерно 500 Гц кривые маскирования практически параллельны оси абсцисс, т. е. почти горизонтальны. На более высоких частотах пороги слышимости маскируемого сигнала начинают возрастать, причем с одной и той же крутизной. Измерения показали, что при увеличении частоты на октаву пороги слышимости во всех случаях возрастают примерно на 3 дБ.

Объяснить этот феномен несложно, если вспомнить о существовании критических полос слуха. Известно, что слух оценивает не общую мощность шума во всей полосе слышимых частот, а его мощность в критических

полосах. Следовательно, каждый отдельно взятый тон маскируется шумом той критической полосы, в которой он находится. До частоты 500 Гц ширина критических полос слуха примерно одинакова и равна 100 Гц. Значит, общая мощность шума в этих полосах также примерно одинакова, поскольку спектральная плотность мощности белого шума, как известно, постоянна во всей полосе частот. Поэтому одинаковым будет и его маскирующее действие. Выше 500 Гц критические полосы слуха начинают увеличиваться в размерах. Значит, интегральная мощность шума в них будет возрастать, а, следовательно, будет возрастать и его маскирующее действие.

Свойство широкополосных шумов оказывать максимальное маскирующее действие на тональные сигналы только в пределах критических полос лежит в основе алгоритмов сжатия звуковых сигналов по стандартам MPEG, Dolby, DTS и пр. Вся полоса слышимых частот здесь, прежде всего, разбивается на ряд субполос, примерно соответствующих критическим полосам слуха. После чего внутри каждой субполосы производится анализ присутствующих в ней спектральных компонент и на основе этого анализа рассчитывается степень маскировки частотных составляющих кодируемого звукового сигнала [23, 24].

В исследовательской практике иногда необходим шум с таким распределением спектральной плотности мощности, чтобы он равномерно маскировал все частотные составляющие звукового сигнала. Для формирования такого шума требуется, чтобы до частоты 500 Гц его спектральная плотность мощности была одинакова и совпадала со спектральной плотностью мощности белого шума, а на частотах выше 500 Гц уменьшалась с крутизной 3 дБ на октаву – как у розового шума. Такой шум называется равномерно маскирующим. Он рассматривался в разделе 2.4.4.

2.7.2. Временная маскировка

Эксперименты показали, что явление маскировки может наблюдаться даже после того как действие маскирующего звука уже закончилось, а также, когда оно еще и не начиналось, т. е. тогда, когда маскер физически не существует. Маскировка, когда маскируемый и маскирующий сигналы не перекрываются по времени, называется **временной маскировкой**.

К временным характеристикам слуха относятся явления постмаскировки и предмаскировки.

Постмаскировка – это увеличение порога слышимости звукового сигнала, наблюдающееся сразу после воздействия маскера, т. е. явление, когда слабые звуки, поступающие сразу после громких звуков, оказываются полностью или частично маскированными из-за последействия предыдущего звука (рис. 2.34). Постмаскировка проявляется в интервале времени 100–200 мс после окончания действия маскирующего звука.

Предмаскировка – это увеличение порога слышимости звукового сигнала, наблюдающееся в непосредственной близости перед появлением маскира, т. е. явление, когда слабые звуки, предшествующие появлению громких звуков, оказываются полностью или частично маскированными этими звуками. Предмаскировка гораздо менее эффективна и проявляется на более коротких временных интервалах в сравнении с постмаскировкой – в течение примерно 10–15 мс (рис. 2.34).

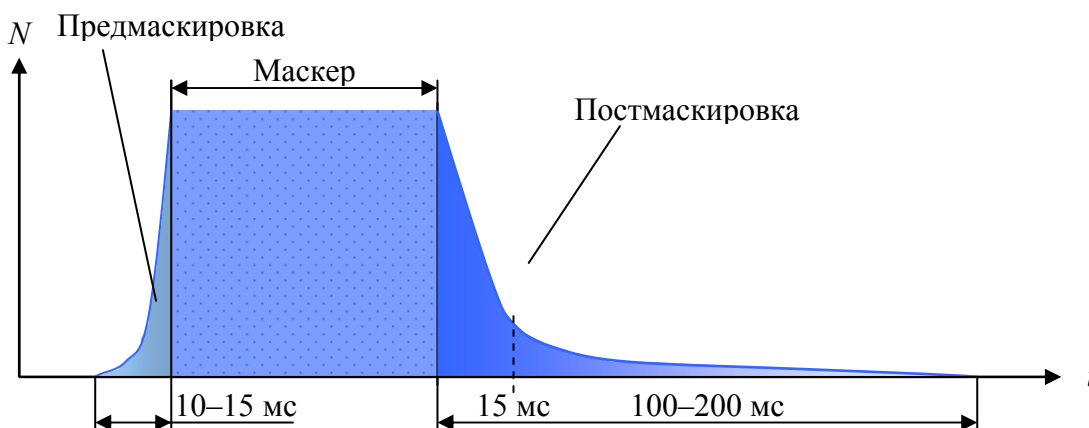


Рис. 2.34. Временная маскировка

Отмечено, что длительность предмаскировки в значительной степени субъективна, т. е. зависит от физиологических особенностей слуха конкретных людей. По этой причине механизмы временной маскировки в алгоритмах компрессии звуковых сигналов почти не используются. Тем не менее знать об их существовании следует.

Многочисленные исследования феномена временной маскировки позволили установить следующие ее особенности:

- постмаскировка более эффективна, чем предмаскировка;
- чем ближе по времени маскируемый сигнал к маскеру, тем степень маскировки выше. Это справедливо как для предмаскировки, так и для постмаскировки;
- маскировка выражена сильнее, когда маскирующий и маскируемый звуки поступают в одно ухо (моноауральное предъявление) и слабее, когда маскируемый звук подается в одно ухо, а маскер – в другое (дихотическое предъявление);
- крутизна спада уровня послемаскировки максимальна в первые 15 мс после прекращения действия маскира, после чего спад становится более пологим (рис. 2.34);
- длительность маскирующего звука влияет на степень предмаскировки, но не влияет на степень постмаскировки;
- временная маскировка зависит от значений частот маскирующего и маскируемого звуков, чем эти частоты ближе друг к другу, тем маскировка проявляется сильнее;

- постмаскировка зависит от характера маскера: тональные маскирующие сигналы обладают более сильным и более продолжительным воздействием в сравнении с узкополосными шумовыми сигналами со сходными характеристиками;

- степень маскировки сигнала при совместном воздействии предмаскировки и постмаскировки получается выше, чем сумма степеней маскировки при их раздельном воздействии. Совместное воздействие обоих видов временной маскировки можно наблюдать в том случае, когда маскируемый сигнал оказывается в промежутке между двумя маскерами.

2.7.3. Центральная (бинауральная) маскировка

Центральная или *бинауральная маскировка* является особым случаем маскировки. Проявляется она в ситуации, когда маскер и исследуемый сигнал поступают в разные уши.

Центральная маскировка гораздо менее эффективна в сравнении с моноауральной и становится заметной только когда время воздействия маскера не менее 200 мс. При этом величина сдвига порога здесь гораздо меньше, чем при моноауральной маскировке. Кроме того, проявляется бинауральная маскировка в основном в области высокочастотных звуков. В низкочастотной части диапазона ее действие гораздо слабее и может наблюдаться только при достаточно высоких уровнях маскера.

Среди других особенностей центральной маскировки можно отметить следующие:

- при небольших уровнях маскера (до 60 дБ) форма кривой границы маскирования симметрична относительно маскера (в отличие от моноауральной маскировки), асимметрия ее начинает проявляться только при интенсивности маскера выше 70 дБ (рис. 2.35);

- так же как и моноауральная, центральная маскировка наиболее эффективна в том случае, когда маскируемый и маскирующий сигналы близки по частоте – в пределах диапазона частот, совпадающего с критической полосой слуха, внутри которой находится маскер;

- бинауральная маскировка наиболее эффективна, когда оба сигнала (маскирующий и маскируемый) являются пульсирующими, особенно в том случае, когда оба они включаются и выключаются одновременно. Если маскер действует на одно ухо постоянно, а маскируемый сигнал пульсирует в другом ухе, то эффективность маскировки гораздо ниже;

- если маскер является постоянно действующим, а маскируемый сигнал – пульсирующим, то увеличение уровня маскера практически не влияет на степень маскировки пульсирующего сигнала. Изменение ее возможно лишь в пределах 1–2 дБ;

- когда оба сигнала – маскирующий и маскируемый являются пульсирующими, то по мере повышения уровня интенсивности маскера степень центральной маскировки будет возрастать.

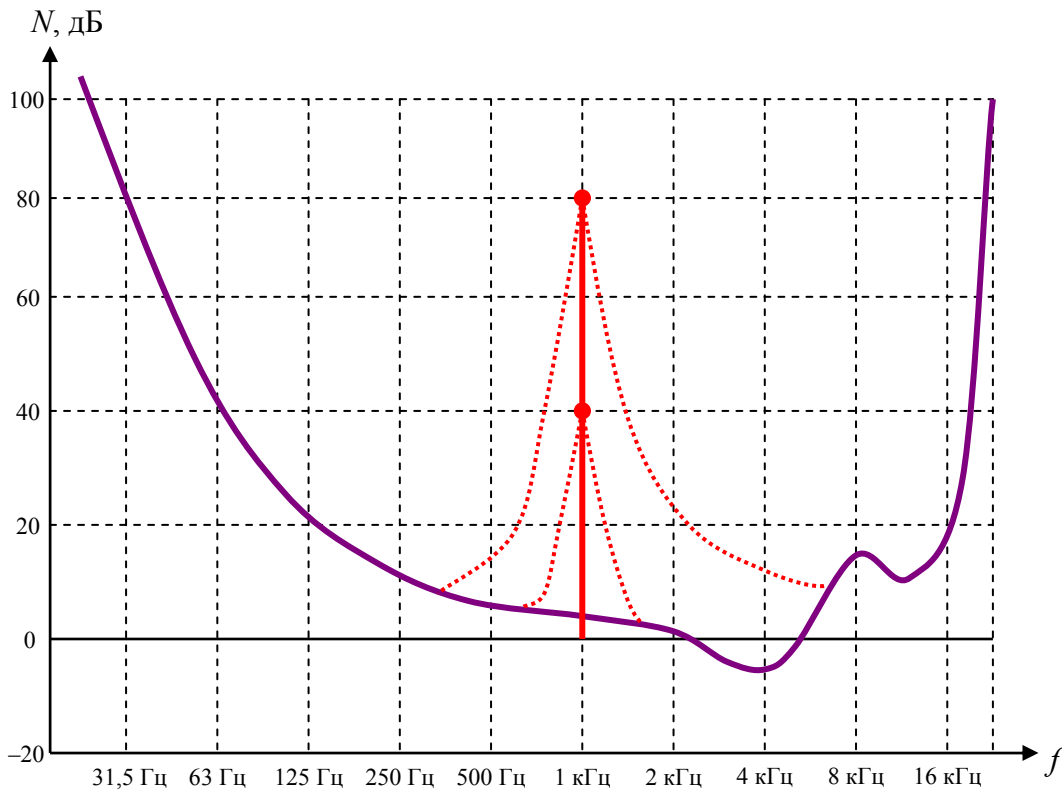


Рис. 2.35. Бинауральная маскировка при разных уровнях маскирующего сигнала

С явлением бинауральной маскировки в повседневной жизни приходится встречаться очень часто, поскольку и речь, и музыка – это процессы пульсирующие. Звукорежиссерам, обеспечивающим звучание музыкальных программ, необходимо учитывать это явление. Как при записи и сведении многоканальных стереофонических программ, так и при размещении на сцене музыкантов во время исполнения концертных программ. Словом, везде, где существует или должна существовать значимая разница между сигналами, поступающими к правому и левому уху слушателя.

2.7.4. Бинауральная демаскировка

Важнейшей особенностью слуховой системы человека, позволяющей ему выделять интересующий звук из множества других маскирующих его звуков, является так называемая **бинауральная демаскировка**.

Эффект бинауральной демаскировки – это проявление применительно к слуховой системе одного из общих свойств всех сенсорных систем человека – избирательности или активности, о котором уже упоминалось в подразделе 1.6.

Бинауральная демаскировка имеет еще одно название, в котором отражено известное всем проявление этого свойства – **«эффект вечеринки» (Cocktail Party Effect)**. И действительно, во время шумной вечеринки

с музыкой, танцами, громкими разговорами и смехом люди, тем не менее, могут расслышать своего собеседника, интуитивно используя для этого некоторые несложные приемы.

Физическая природа бинауральной демаскировки состоит в том, что при определенных условиях пороги маскирования требуемого звука окружающим шумом могут быть понижены и желаемый звук будет услышан.

Для того чтобы определить условия, при которых проявляется эффект бинауральной демаскировки, был проделан ряд экспериментов, результаты которых представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Бинауральная маскировка при различных вариантах подачи сигнала и маскера

№ варианта	Условия подачи сигнала и маскера	Результат
1	Сигнал и шум подаются на одно ухо через один из стереотелефонов. Шум полностью маскирует сигнал	Сигнал не слышен на фоне шума
2	Сигнал и шум также через стереотелефоны подаются на оба уха. Шум полностью маскирует сигнал	Сигнал не слышен на фоне шума
3	Сигнал и шум, полностью маскирующий сигнал, подаются на одно ухо. На другое ухо подается такой же шум, но без сигнала	Сигнал прослушивается ближе к тому уху, через которое подается. Шум прослушивается в центре головы
4	Сигнал и шум подаются на оба уха, как в варианте 2, но фаза шума, подаваемого на одно ухо, изменена на 180° по отношению к шуму, подаваемому на другое ухо	Сигнал хорошо прослушивается на фоне шума
5	Сигнал и шум подаются на оба уха, как в варианте 2, но фаза сигнала, подаваемого на одно ухо, изменена на 180° по отношению к сигналу, подаваемому на другое ухо	Сигнал хорошо прослушивается на фоне шума
6	Сигнал и шум подаются на оба уха, как в варианте 2, но фаза шума (или сигнала), подаваемого на одно ухо, изменена по отношению к шуму (или сигналу), подаваемому на другое ухо, на угол, меньший 180°	Сигнал прослушивается на фоне шума, но слабее, чем в вариантах 4 и 5

Варианты 1 и 2 дают предсказуемый результат – шум полностью маскирует полезный сигнал.

В варианте 3 шум и сигнал локализируются в разных местах головы: шум – в середине, а сигнал – ближе к тому уху, через которое подается. Сигнал как бы перемещается из области концентрации шума в область относительной тишины, его уровень при этом субъективно повышается и он сразу обнаруживается. Повышая уровень шума до тех пор, пока сигнал снова окажется полностью маскированным, можно определить уровень бинауральной демаскировки в децибелах. Для варианта 3 он составляет примерно 9 дБ.

Этот вариант является интерпретацией того, что происходит на вечеринке: слушающий находит такое положение головы, при котором в оба уха ему поступает примерно одинаковый шум. Тогда источник шума оказывается в центре головы, а голос собеседника – ближе к одному из ушей. Установлено, однако, что такой механизм срабатывает только при наличии в спектре прослушиваемого сигнала низкочастотных составляющих. Поэтому низкий мужской голос в условиях вечеринки будет слышен лучше высокого женского.

В вариантах 4 и 5 уровень бинауральной демаскировки еще выше – для частоты 250 Гц 13 и 15 дБ соответственно. При увеличении частоты уровень бинауральной демаскировки значительно уменьшается (до 3 дБ на частотах 1000–1200 Гц). Однако в реальных условиях такой вариант вряд ли возможен – фазу шума или сигнала можно менять только в условиях эксперимента (путем изменения полярности проводов в одном из головных стереотелефонов).

В варианте 6 уровень бинауральной демаскировки ниже, чем в вариантах 5 и 6. Степень ее уменьшения зависит от того, насколько сдвиг фазы отличается от 180° .

Результаты экспериментов были примерно одинаковыми как для тональных, так и для речевых сигналов.

2.8. Нелинейные свойства слуха

Загадочные явления, связанные с человеческим слухом и состоящие в том, что при достаточно громком исполнении двух нот можно услышать еще и призвуки какого-то «лишнего» тона, были известны уже давно. Открытие этого феномена приписывают знаменитому итальянскому скрипачу и композитору Джузеппе Тартини (1692–1770), известному своей «Дьявольской сонатой» («Sonate du diable»), которую он, по его же словам, впервые услышал во сне в исполнении самого Дьявола. Еще в 1714 г. Тартини обратил внимание на странное явление: если на скрипке громко проигрываются два консонирующих верхних звука, то вместе с ними возникает еще и нижний третий отзвук, причем находящийся в консонансном отношении с первыми двумя. Такие фантомные разностные тоны были даже названы в честь их первооткрывателя *тонами Тартини*. Впоследствии в 1740 г., независимо от Тартини, на комбинационные разностные тоны обратил внимание еще и немецкий органист Георг Андреас Зорге (1703–1778), которому также приписывают открытие этих тонов. Причем сообщение о своем открытии Зорге опубликовал раньше Тартини. Спустя столетие исследованием «фантомных» тонов занялся немецкий физик, врач, физиолог и психолог Герман Гельмгольц (Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц (1821–1894)). В результате многочисленных экспериментов

ему удалось установить, что дополнительные «фантомные» тоны возникают непосредственно в слуховой системе человека и являются следствием ее нелинейности.

Динамическая система называется нелинейной, когда в ней протекают процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями. Одним из признаков нелинейности колебательной системы является появление в ее отклике колебаний с частотами, которые отсутствовали в воздействии.

Электромеханические преобразователи, в том числе электроакустические приборы (микрофоны, громкоговорители и пр.), являются в той или иной степени нелинейными. Однако нелинейность эта проявляется, как правило, при достаточно высоких уровнях входного сигнала.

В большинстве случаев нелинейность слухового аппарата начинает проявляться, когда уровень звукового сигнала еще не слишком высок – начиная с 40 дБ. При уровнях основного сигнала выше 60 дБ слышимость «фантомных» тонов резко возрастает и может достигать 10–50 % от уровня основного тона. Возрастает также и их число. Поэтому при высоких уровнях основного сигнала суммарный уровень «фантомных» тонов может даже превысить уровень основного тона. Установлено также, что некоторые виды нелинейности слухового аппарата могут проявляться и при очень малых уровнях звукового сигнала – порядка 10 дБ.

Различают несколько видов проявления нелинейности слухового аппарата, которые порождают «фантомные» тоны, находящиеся в разных численных соотношениях с основным звуковым сигналом. Предполагается, что и механизмы возникновения таких тонов также различны.

Прежде всего, нелинейность слуха вызывает появление «фантомных» гармоник основного тона, т. е. если воздействовать на барабанную перепонку достаточно громким синусоидальным звуковым сигналом с некоторой частотой f_0 , то в результате обработки этого сигнала слуховым аппаратом появятся его «фантомные» гармоники с частотами $2f_0$, $3f_0$ и т. д. Если, скажем, сформировать тональный звуковой сигнал с частотой 1000 Гц, то вместе с ним можно услышать и звуки с частотами 2000 Гц, 3000 Гц и т. д. Поскольку в спектре сформированного звукового тона этих гармоник нет, то они получили название *субъективных* или *слуховых гармоник*.

Несмотря на то, что субъективные гармоники физически не существуют, их уровень, тем не менее, можно достаточно точно оценить. Для этого вместе с основным звуковым тональным сигналом (например, 1000 Гц) нужно сформировать дополнительный тон небольшого уровня, частоту и уровень которого можно плавно изменять. Регулируя частоту дополнительного тона, можно приблизить ее к частоте субъективной гармоники (например, 2000 Гц) так, чтобы между ними возникли биения с некоторой

разностной частотой $f_{\text{раз}}$. Например, если частота дополнительного тона составляет 990 Гц, то $f_{\text{раз}} = 10$ Гц. Поскольку известно, что наиболее четкие биения будут прослушиваться в том случае, когда амплитуды сигналов взаимодействующих частот одинаковы, то, измерив уровень дополнительного тона в этом состоянии, получим объективную оценку уровня физически не существующей субъективной гармоник. Такая технология измерений называется *методом наилучших биений*. С ее помощью можно оценить уровень не только второй субъективной гармоник, как в описанном случае, но и уровни субъективных гармоник более высоких порядков.

Измерения, выполненные с помощью метода наилучших биений, позволили установить зависимость величин уровней субъективных гармоник от уровня основного испытательного тона. Например, при уровне испытательного тона с частотой 1000 Гц, равном 80 дБ, уровень звукового давления второй субъективной гармоник оказался равным 63 дБ. Соотношение уровней субъективных гармоник и уровня основного испытательного тона сильно зависит от последнего: чем он меньше, тем меньше относительный уровень субъективных гармоник. Когда он становится ниже 40 дБ, уровень субъективных гармоник становятся настолько незначительным, что они перестают ощущаться на слух, и возникает ощущение чистоты тона.

На рис. 2.36 приведены графики, показывающие как изменяются уровни субъективных гармоник при изменении уровня основного испытательного тона. Видно, что с его увеличением уровни субъективных гармоник резко возрастают, а также увеличивается их число: при уровне основного тона 60 дБ существуют только две субъективные гармоник, а при уровне 130 дБ их количество возрастает до восьми.

Существует гипотеза, что именно благодаря наличию субъективных гармоник мы способны воспринимать низкочастотные звуковые колебания в диапазоне от 20 Гц до примерно 100 Гц. Дело в том, что физиология слуховых органов человека не позволяет ему воспринимать звуки ниже 100 Гц – участком, воспринимающим именно эту частоту, верхняя часть базилярной мембраны заканчивается. Дальше уже ничего нет. Тем не менее область звуков, воспринимаемых на слух, распространяется и на диапазон гораздо более низких частот. Напрашивается предположение, что акустические колебания с частотами ниже 100 Гц воспринимаются не сами по себе, а за счет создаваемых ими субъективных гармоник, которые попадают в область частот выше 100 Гц и обеспечивают формирование слухового ощущения. На уместность такого предположения указывает целый ряд косвенных факторов, но прямого подтверждения пока не найдено.

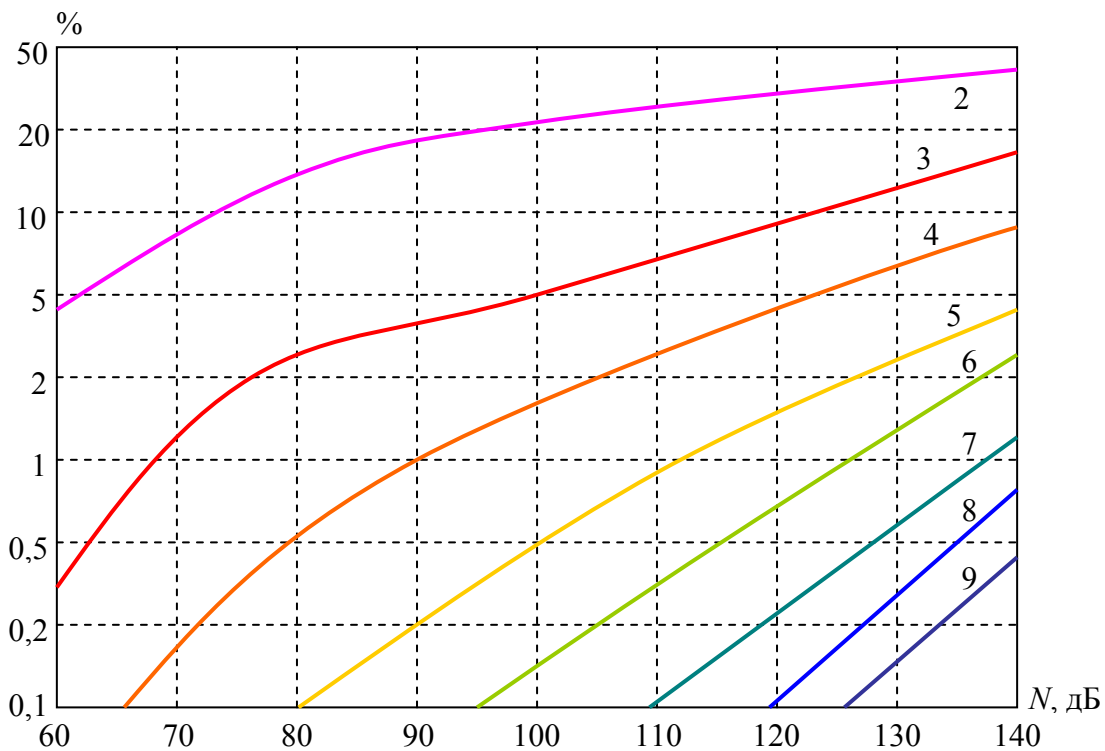


Рис. 2.36. Зависимость уровней субъективных гармоник от уровня основного тона (в %): 2...9 – номера гармоник

Как всякая нелинейная система слуховой аппарат, кроме «фантомных» слуховых гармоник, способен формировать еще и **комбинационные слуховые тоны** различных порядков: **вторичные** – с частотами $f_2 - f_1$ и $f_2 + f_1$, **кубические** с частотами $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$, $2f_1 + f_2$, $2f_2 + f_1$ и комбинационные тоны более высоких порядков. Например, два первичных тона достаточно высокого уровня с частотами $f_1 = 1000$ Гц и $f_2 = 1200$ Гц приведут к появлению вторичных комбинационных тонов с частотами $f_2 - f_1 = 200$ Гц и $f_2 + f_1 = 2200$ Гц, кубических комбинационных тонов $2f_1 - f_2 = 800$ Гц, $2f_2 - f_1 = 1400$ Гц, $2f_1 + f_2 = 3200$ Гц, $2f_2 + f_1 = 3400$ Гц и т. д.

Уровни комбинационных слуховых тонов, также как и уровни слуховых гармоник, могут быть измерены с помощью описанного выше метода наилучших биений. Кроме него может быть использована и другая технология оценки уровня «фантомных» тонов, которая называется «**метод погашений**». Для этого вместе с основными тональными сигналами необходимо сформировать дополнительный сигнал с частотой комбинационного тона и отрегулировать его амплитуду и фазу таким образом, чтобы комбинационный тон оказался «погашенным». Полное погашение произойдет в том случае, когда амплитуды сигналов будут одинаковыми, а фазы сдвинуты относительно друг друга на 180° , т. е. дополнительный и комбинационный тоны будут в противофазе. Следовательно, уровень комбинационного тона будет в точности равен уровню дополнительного.

Исследования показали, что чаще всего прослушиваются два типа разностных тонов: вторичный тон с частотой $f_1 - f_2$ (именно на него обратил в свое время внимание Джузеппе Тартини) и кубичный тон с частотой $2f_1 - f_2$.

Простой разностный тон ведет себя, как в случае классической квадратичной нелинейности: его можно услышать, если уровень первичных тонов больше чем 50 дБ. При равенстве уровней двух первичных тонов уровень разностного тона увеличивается на 2 дБ при возрастании уровня каждого первичного тона на 1 дБ. Величина уровня разностного тона не очень сильно зависит от отношения частот f_2/f_1 .

В случае кубичного разностного тона установлено, что он возникает в основном при соотношении частот $1 < f_2/f_1 < 1,3$. В этом частотном диапазоне его можно услышать при очень низком уровне первичных тонов (ниже 40 дБ), уровень f_2 может быть даже ниже 10 дБ. Все это заставляет предположить, что в образовании этих тонов участвуют какие-то дополнительные механизмы.

Многочисленные исследования позволили получить ряд очень интересных результатов относительно механизмов возникновения нелинейности. Экспериментально доказано, что преобразование сигнала во внешнем и среднем ухе при средних уровнях сигнала есть линейный процесс; только при очень больших уровнях начинает проявляться нелинейность работы среднего уха, обусловленная несимметричной формой барабанной перепонки, разницей сил, удерживающих ее в состоянии натяжения, а также нелинейностью движений слуховых косточек. В результате силы, возвращающие барабанную перепонку и слуховые косточки в исходное положение, оказываются больше при смещении в одну сторону и меньше при смещении в другую сторону. Но основная причина нелинейности как при больших, так и при малых уровнях сигнала заключается в механизме работы внутреннего уха (улитки, заполненной жидкостью). При высоких уровнях сигнала в жидкости улитки образуются вихревые потоки, которые искажают форму звукового импульса. Спектральный анализ этого импульса, который выполняется органом, называемый базилярной мембраной, приводит к появлению дополнительных гармоник и комбинационных тонов.

Существует и еще одна причина появления нелинейности при малых уровнях сигнала – она связана с процессами электрического преобразования сигнала в специальных органах – волосковых клетках.

Следует отметить, что последний механизм работает только в определенном диапазоне частот звукового сигнала: при очень длительном воздействии громких звуков волосковые клетки повреждаются, и зависимость смещения мембраны от уровня сигнала приобретает чисто линейный характер (что приводит к дальнейшему разрушению волосковых клеток). Таким образом, появление слышимых «слуховых» гармоник и комбинационных тонов является признаком нормальной работы слухового аппарата и свидетельствует о хорошем состоянии слуха.

2.9. Адаптация слуха

При воздействии на барабанную перепонку слухового аппарата достаточно длительного звука высокой интенсивности воспринимаемая слушателем громкость этого звука будет постепенно уменьшаться. Это свидетельствует о том, что при длительном воздействии на слуховой аппарат громких звуков его чувствительность постепенно снижается. Такой механизм позволяет слуховой системе защититься от воздействия чересчур громких звуков, которые могут вызвать ее повреждение. После прекращения воздействия громкого звука или уменьшения его уровня, нормальная чувствительность слуха постепенно восстанавливается.

Изменение чувствительности слухового аппарата называется *адаптацией*. Адаптация позволяет слуховой системе приспособливаться к уровню воздействующего на нее звука. Если интенсивность звука велика, то чувствительность слуха снижается, если мала – то увеличивается.

На рис. 2.37 приведены диаграммы, иллюстрирующие изменение чувствительности слухового аппарата, выраженной величиной ощущаемой громкости звука G (рис. 2.37, б), при скачкообразном изменении уровня звукового давления N (рис. 2.37, а), и отражены результаты опыта, проведенного в свое время физиком Георгом фон Бекешем.

Опыт состоял в наблюдении за изменением чувствительности слуха при воздействии звуковых сигналов в виде импульсов длительностью по 2 мин. При уровне звукового давления 94 дБ (рис. 2.37, а) наблюдалось плавное снижение воспринимаемого уровня громкости с 94 до 85 фон (рис. 2.37, б). Скорость падения уровня громкости в период времени от 0 и примерно до 40 с – высокая, а затем она постепенно уменьшается почти до нуля.

При последующем скачкообразном возрастании звукового давления на 6 дБ (рис. 2.37, а) уровень громкости сначала возрастает на 10 фон, а затем вновь начинает уменьшаться (рис. 2.37, б). Однако уменьшение уровня громкости в этом случае заметно меньше – с 95 до 88 фон. Это значит, что степень адаптации тем выше, чем громче утомляющий звук.

Особенно сильно изменение уровня ощущаемой громкости G проявляется при резком уменьшении интенсивности N воздействующего звука. На рис. 2.38 показано изменение воспринимаемого уровня громкости G при скачкообразном падении уровня звукового давления N с 94 до 85 дБ. Скачок уменьшения уровня громкости G при этом составляет почти 20 фон. Затем происходит адаптация слуха к тишине, чувствительность слуха частично восстанавливается, и воспринимаемый уровень ощущаемой громкости G возрастает через 2 минуты на 12 фон.

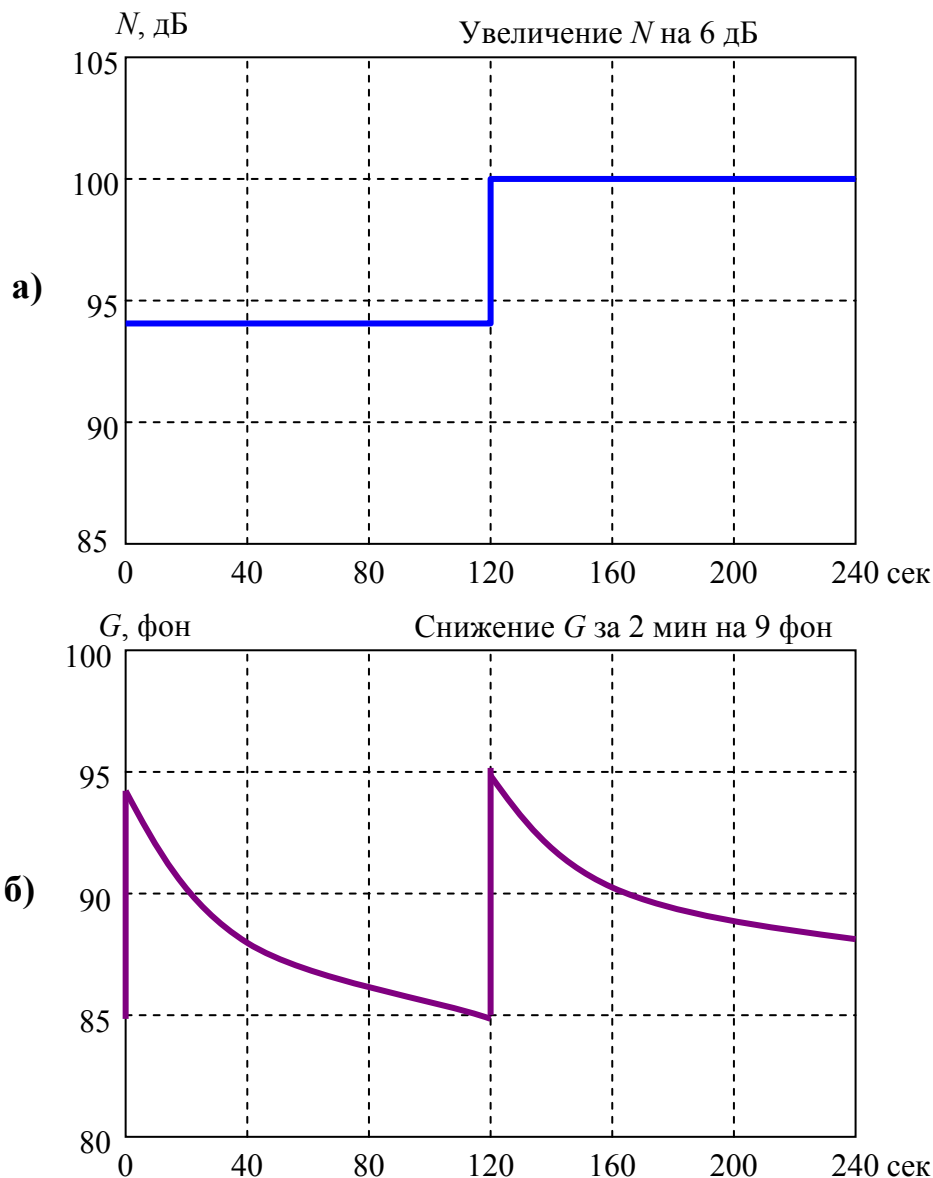


Рис. 2.37. Адаптация слуха при увеличении звукового давления

Таким образом, адаптация проявляется в виде снижения чувствительности слуха при достаточно длительном воздействии опасного громкого звука и восстановлении ее при уменьшении громкости утомляющего звука.

Однако защитная способность слухового аппарата, к сожалению, не безгранична. Еще Георг Бекеш в своих экспериментах установил, что процесс адаптации имеет тенденцию к насыщению. Например, при уровне звукового сигнала $N = 94$ дБ степень адаптации слуха $\Delta G = 14$ фон, а при $N = 108$ дБ $\Delta G = 17$, т. е. уровень звукового сигнала увеличился на 14 дБ, а степень адаптации всего на 3 фона. По этой причине при длительном воздействии достаточно громких звуков защитных возможностей механизма адаптации может не хватить, и в конечном итоге, это приведет к необратимым изменениям в слуховой системе.

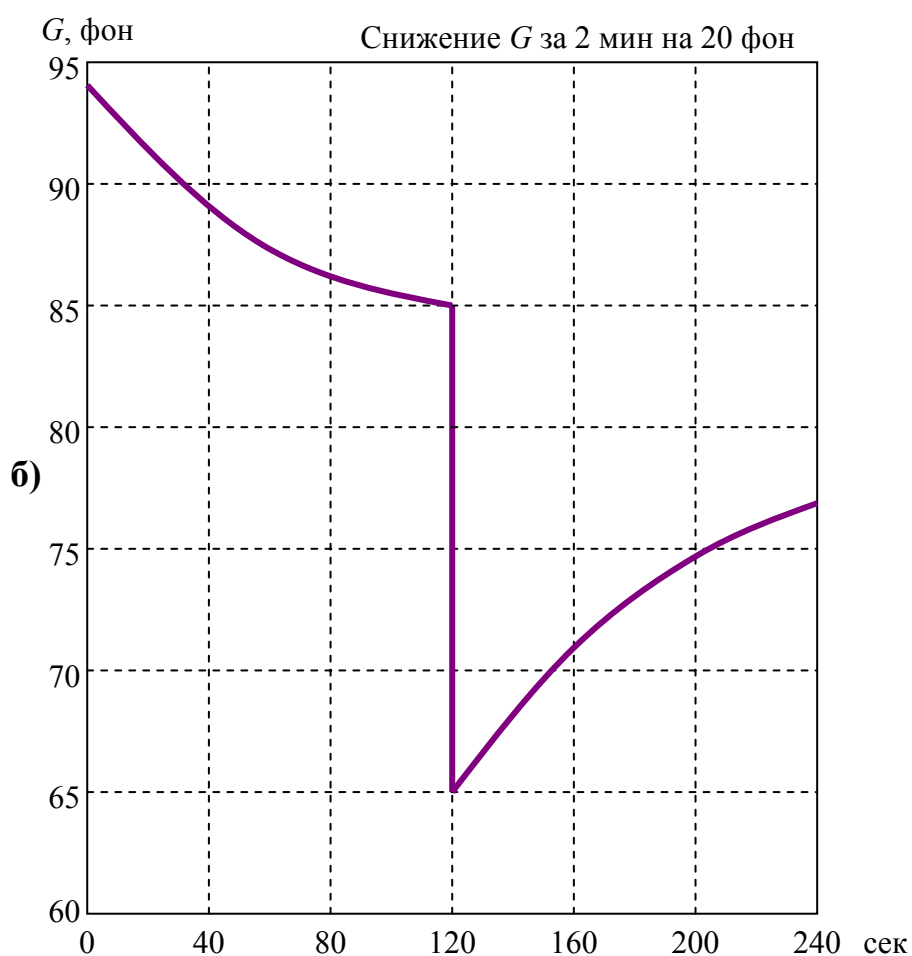
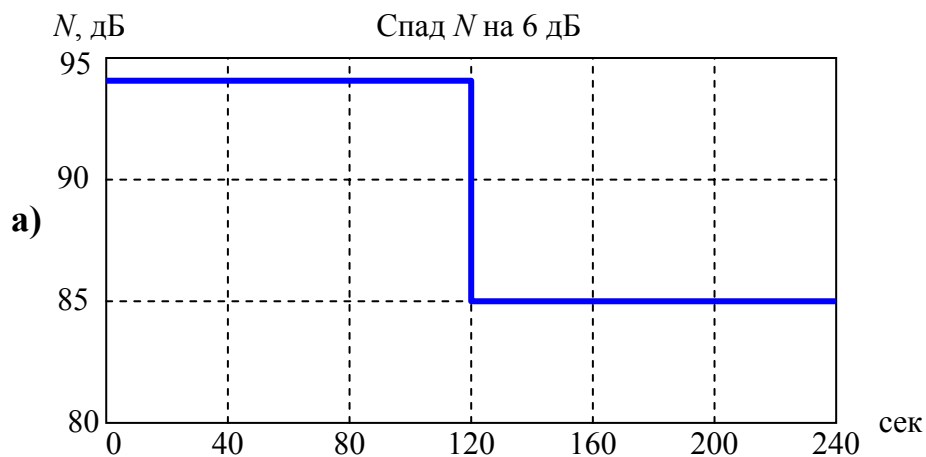


Рис. 2.38. Адаптация слуха
при уменьшении звукового давления

Кроме того, механизм адаптации обладает некоторой инерцией – он начинает работать только спустя 20–30 мс после начала воздействия звука. Полная же защита слуха от воздействия высоких уровней звукового сигнала (в пределах возможностей механизма адаптации) достигается только за 150–200 мс. Поэтому для слуха наиболее опасны очень короткие громкие звуки: выстрелы, удары в барабан и пр.

Для оценки степени адаптации слуха к ощущению громкости введено понятие *постоянной времени слуха*. Это величина, численно равная периоду времени, в течение которого ощущение громкости звука уменьшается на 9–10 фон. Экспериментально установлено, что эта величина равна примерно 35 мс.

Механизм адаптации обеспечивается процессами, происходящими в среднем и во внутреннем ухе, т. е. акустическим рефлексом, оттягивающим стремечко от овального окна и увеличивающим натяжение барабанной перепонки, и нелинейной компрессией, присущей внутреннему уху. Запускается механизм адаптации при уровнях звукового сигнала, превышающих 90 дБ.

2.10. Бинауральный слух

Наличие у человека двух каналов приема акустических сигналов позволяет ему не только слышать звуки, но и получать информацию о расположении источников звука в пространстве. Такая информация нередко оказывается крайне необходимой, так как позволяет человеку оценивать свое собственное положение относительно источников звука и возможность перемещаться в нужном направлении даже в отсутствии видимости – например ночью.

Способность человека (равно как и животного) определять направление на источник звука благодаря разнице характеристик акустических колебаний, воспринимаемых каждым из ушей в отдельности, называется *бинауральным слухом* (от латинских слов *bini* – два и *auricular* – ухо).

Звуковая информация, поступающая в каждый из слуховых каналов, сначала обрабатывается в периферической части слуховой системы, а затем передается в высшие отделы головного мозга, где путем сравнительного анализа ее компонент формируется единый пространственный слуховой образ.

Наличие бинаурального слуха обеспечивает человеку целый набор разнообразных возможностей, облегчающих ему существование в окружающем мире. К наиболее важным из них можно отнести следующие:

- возможность определения направления на источник звука, позволяющая формировать трехмерную картину расположения таких источников в пространстве;

- разделение сигналов, поступающих от некоторого множества источников звука, расположенных в различных точках пространства;

- выделение сигналов, поступающих от интересующего нас источника звука, из множества других звуковых сигналов, в том числе – выделение прямого звука из множества его реверберационных продолжений в помещении, выделение речи собеседника на фоне шумов и т. д.

Потенциальные возможности бинаурального слуха в настоящее время являются предметом интенсивных научных исследований как в сфере медицины (для изучения функционирования и специализации полушарий головного мозга), так и в сфере аудиотехнологий (для создания многоканальных систем пространственного звучания и трехмерных виртуальных звуковых полей).

Основными свойствами бинаурального слуха можно считать пространственную локализацию источников звука, эффект предшествования (эффект Хааса), бинауральное суммирование мощности, бинауральную демаскировку и пр. [5, 9–11, 18, 25]. Рассмотрим некоторые из этих свойств.

2.10.1. Пространственная локализация источников звука

Находясь в помещении, где присутствует множество источников акустических колебаний (например, в концертном зале во время исполнения оркестром произведения в жанре симфонической музыки), человек, даже закрыв глаза, может достаточно точно определить состав оркестра и направление на каждый из звучащих инструментов. Эта способность называется **бинауральной пространственной локализацией**. Кроме определения азимута, человек также способен определить высоту, на которой расположен звучащий объект, и примерное расстояние до него, хотя здесь дело обстоит несколько хуже – точность вертикальной и глубинной локализации значительно меньше, чем горизонтальной. Это объясняется различиями в механизмах каждого вида локализации.

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ (АЗИМУТАЛЬНАЯ) ЛОКАЛИЗАЦИЯ

Наивысшей точностью обладает горизонтальная локализация. Объяснение этому очень простое – внешние части органов слуха человека (ушные раковины) расположены по горизонтали на некотором расстоянии друг от друга, следовательно, сигналы, поступающие на них, в большинстве случаев имеют некоторые отличия, анализируя которые можно сделать вывод относительно направления на источник звука. Человека, как и всякое другое сухопутное существо, перемещающееся по поверхности земли, более всего интересует то, что происходит рядом с ним – также на поверхности земли. Поэтому природа позаботилась о том, чтобы обеспечить ему возможность достаточно надежного контроля окружающей обстановки.

Поскольку приемников акустических колебаний у человека два, то если, к примеру, источник звука находится справа от слушателя, расстояние от него до правого уха меньше, чем до левого, и фронт звуковой волны достигнет правого уха раньше. Это первый – **временной** физический фактор, помогающий определить направление на источник звука. В англоязычной литературе он обозначается аббревиатурой **ITD** (**Interaural Time Difference**).

Величину ITD , т. е. разницу во времени прихода одинаковых фаз звуковой волны до левого и правого уха, можно определить, зная разность хода Δx : $ITD = \Delta x/C$, где C – скорость распространения звуковой волны в воздухе (рис. 2.39).

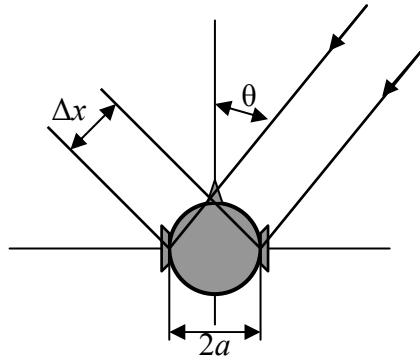


Рис. 2.39. К расчету разницы (ITD) во времени прихода фронта звуковой волны от источника к левому и правому уху

Величину ITD можно рассчитать, используя величину угла θ между плоскостью симметрии головы (медианной плоскостью) и направлением прихода звуковой волны, отсчитываемого в горизонтальной плоскости, величину радиуса человеческой головы a и величину скорости звука C :

$$ITD = a/C(\theta + \sin \theta) \text{ при } -\pi/2 < \theta < +\pi/2, \quad (2.4)$$

где θ – азимутальный угол в радианах;

a – радиус головы, который в среднем составляет примерно 9 см;

C – скорость звука в воздухе, которая при температуре 20 °C составляет примерно 343 м/с.

Очевидно, что при расположении источника звуковых колебаний прямо перед слушателем, т. е. в плоскости симметрии его головы, величина ITD будет равна нулю. Если же источник расположен сбоку, точно напротив одного уха, то величина ITD будет равна $a/C(\pi/2 + 1)$, что составляет примерно 0,7 мс.

На рис. 2.40 показана зависимость разницы во времени прихода звуковой волны к одному и другому уху (ITD) от угла, под которым расположен источник акустических колебаний, снятая для частоты 1500 Гц. Очевидно, что при перемещении источника звука вокруг головы от положения прямо перед слушателем ($\theta = 0^\circ$) до положения позади слушателя ($\theta = 180^\circ$) максимальная разница во времени возникает при $\theta = 90^\circ$. Здесь следует обратить внимание на тот факт, что для синусоидальных колебаний на частоте 800 Гц максимальное время запаздывания ITD становится равным уже половине периода колебания звуковой волны ($T/2$), а при еще более высоких частотах превышает половину периода ($ITD > T/2$). В этом случае неизбежно

возникает неясность в определении фазовых соотношений между волнами, действующими на правое и левое ухо. С одинаковым основанием можно считать, что одна волна отстает по фазе от другой на время t или опережает ее на то же самое время. Следовательно, чтобы правильное определение направления на источник звуковых колебаний было возможным, время запаздывания не должно превышать половины периода волны [26].

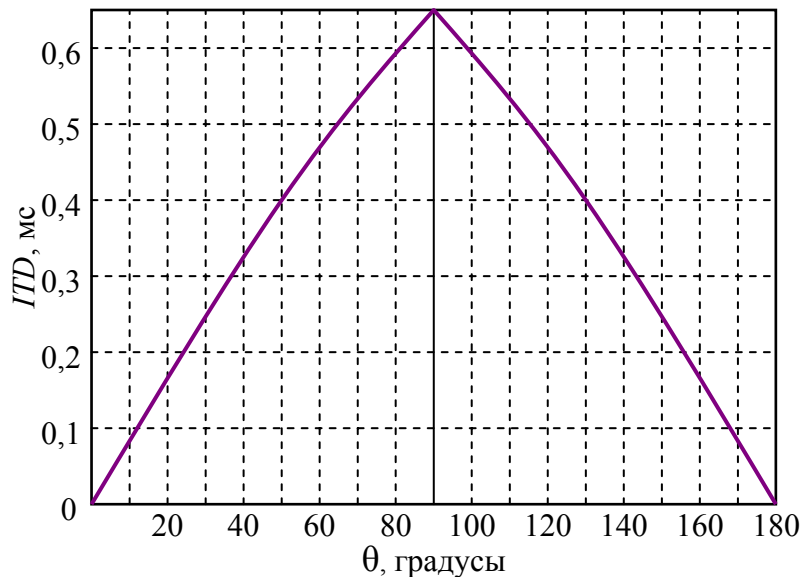


Рис. 2.40. Зависимость величины ITD от угла θ прихода звуковой волны

По этой причине наибольшее значение азимутального угла θ_{\max} , при котором еще возможно правильное определение направления на источник звука за счет временного бинаурального эффекта, с повышением частоты уменьшается. Расчетные значения θ_{\max} для разных частот, вычисленные по формуле (2.4) путем подстановки $ITD = T/2$, приведены в табл. 2.7. Из таблицы видно, что, к примеру, на частоте 3200 Гц угол, в пределах которого можно правильно определить направление на источник звука, составляет всего $\pm 14^\circ$ относительно плоскости симметрии головы. При больших отклонениях от этой плоскости время запаздывания ITD будет превышать $T/2$ и правильная локализация направления на источник звука за счет только временного фактора становится невозможной. Фронтальное направление на источник звука (перед слушателем) может быть ошибочно принято за тыловое с тем же самым углом относительно медианной плоскости (позади слушателя). Однако в области частот выше 800 Гц решающее значение начинает играть другой фактор – интенсивностный, поэтому неопределенность, которую вносит временной фактор, оказывается уже не столь существенной [26]. Интенсивность звукового сигнала будет выше с той стороны, откуда приходит сигнал, и неопределенность фронт-тыл тем самым будет устранена.

Таблица 2.7

Значения θ_{\max} для некоторых частот

Частота, Гц	$T/2$, мс	θ_{\max} , градусы
400	1,250	90
800	0,625	90
1200	0,417	42
1600	0,313	30
2000	0,250	24
2400	0,208	19
3200	0,151	14
4000	0,125	11

Вторым физическим фактором является **интенсивностный (IID – Interaural Intensity Difference)**. Он обусловлен дифракцией звуковых волн вблизи головы. Поскольку длина волны звуковых колебаний низких и средних частот больше диаметра головы (или сравнима с ним), то в полном соответствии с законами дифракции эти звуки огибают голову и поступают в ухо, расположенное дальше, с той же интенсивностью, что и в ближайшее. Однако звуки высокой частоты, имеющие длину волны меньше диаметра головы, обогнуть ее не могут, поэтому позади нее образуется «акустическая тень», уменьшающая общую интенсивность звукового сигнала, поступающего к уху, расположенному с противоположной от источника звука стороны. За счет этого возникает разность по интенсивности, которая также способствует определению направления на источник звука.

Наибольшая разница по уровням интенсивности звукового сигнала, действующих на левое и правое ухо, разумеется, будет наблюдаться в тех случаях, когда источник акустических колебаний находится либо точно справа, либо точно слева от слушателя ($\theta = 90^\circ$). На рис. 2.41 показано семейство кривых, снятых для различных частот и выражающих зависимость разницы уровней звукового давления (dN) у левого и правого уха от угла, под которым расположен источник акустических колебаний относительно медианной плоскости головы. Видно, что эта разница (IID) увеличивается по мере повышения частоты. На частоте 1000 Гц она составляет примерно 10 дБ, на частоте 5000 Гц достигает величины около 20 дБ и при дальнейшем повышении частоты продолжает увеличиваться еще больше. Объясняется это тем, что чем выше частота, тем эффективнее экранирующее действие головы. «Акустическая тень» с повышением частоты как бы все больше сгущается, и все меньшая часть энергии звуковых колебаний доходит до уха противоположного источнику.

Следовало бы ожидать, что при повышении частоты звуковых колебаний способность слуха к локализации источника должна улучшаться. Однако это не совсем так. Высокий уровень локализации наблюдается только в области средних частот – примерно от 300 до 1000 Гц. При дальнейшем повышении частоты локализация ухудшается, а чистые тоны с частотами

свыше 8000 Гц локализации почти не поддаются. Такая же картина наблюдается при определении направления на источник низкочастотных колебаний. После 300 Гц локализация значительно ухудшается, а ниже 150 Гц отсутствует вообще. Именно этим объясняется тот факт, что в многоканальных системах пространственного звучания используется только один сабвуфер и размещать его можно где угодно. Всем также хорошо известно, что когда раздаются раскаты грома во время грозы, невозможно определить с какой именно стороны неба грохочет, если, конечно, не видно вспышек молнии.

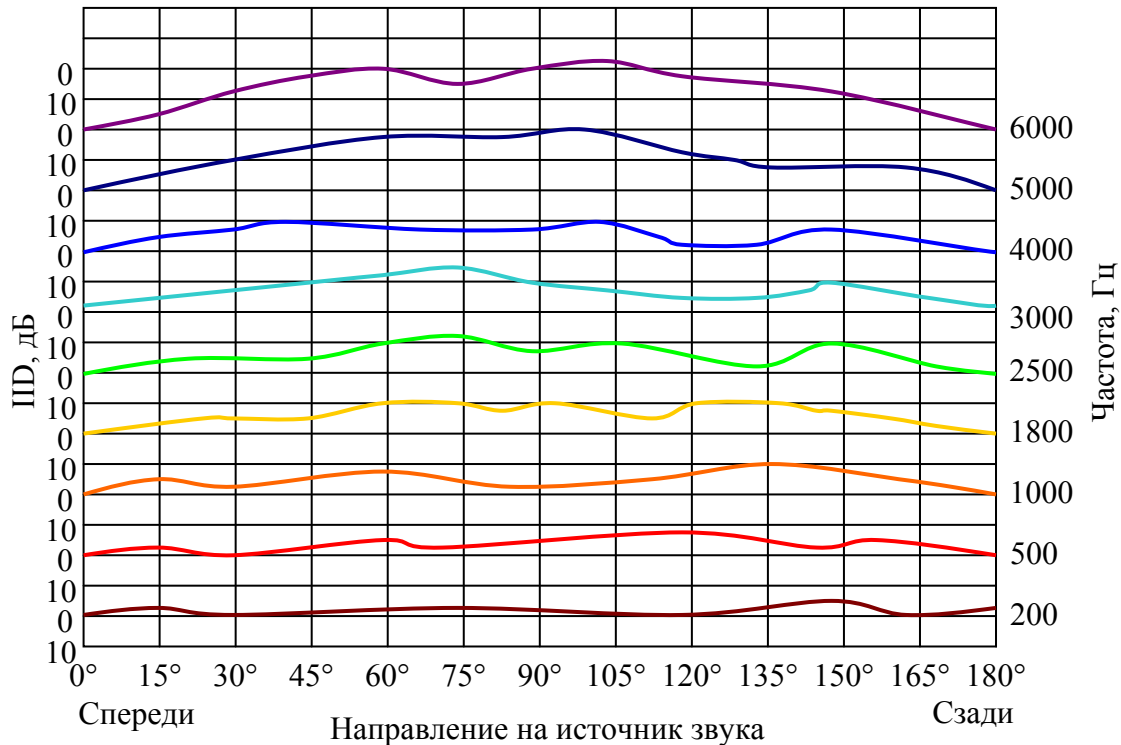


Рис. 2.41. Зависимость разницы интенсивностей звукового давления (*IID*) у разных ушей от угла между направлением на источник звука и медианной плоскостью головы для различных частот

Невозможность определения направления на источник низкочастотных звуков с древнейших времен использовали некоторые африканские племена. Большие барабаны служили у них средством для предупреждения соплеменников о нападении врага. Наблюдатели с такими барабанами располагались в удобных для наблюдения местах вокруг территории, где проживало племя. В случае опасности разведчик бил в барабан, и его громкое звучание разносилось на многие километры. При этом противнику почти невозможно было определить, где именно сидит барабанщик.

Исследования зависимости величин ошибок локализации от частоты с использованием синусоидального источника показали, что наиболее значительные ошибки наблюдаются в полосе частот 2000–4000 Гц (рис. 2.42).

Можно предположить, что здесь, вероятно, определяющая роль переходит от временного механизма локализации к интенсивностному.

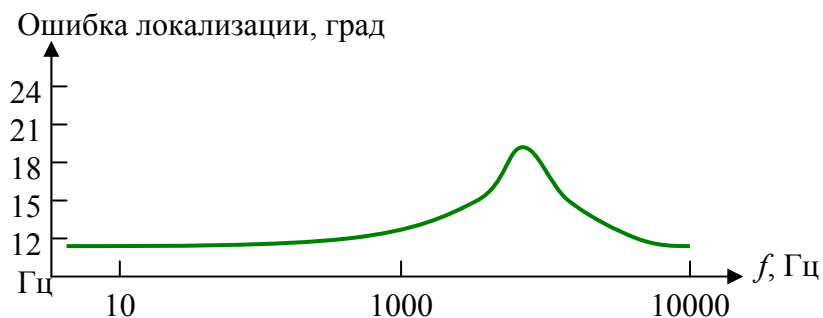


Рис. 2.42. Зависимость ошибки локализации от частоты колебаний

Минимальная ошибка при определении направления на источник звуковых колебаний наблюдается в том случае, когда источник расположен перед слушателем, максимальная – когда он либо справа, либо слева. Более того, в направлениях, перпендикулярных медианной плоскости головы, существует так называемый «**конус неопределенности**», внутри которого изменение положения источника звука слушателем практически не ощущается (рис. 2.43). Причина такого явления состоит в том, что при боковом расположении источника получается максимальная разница как во времени прихода звуковой волны к разным ушам, так и в ее интенсивности. Небольшие перемещения источника вызывают слишком незначительные относительные изменения этих величин, чтобы слух мог их зарегистрировать. Поэтому, когда человеку необходимо контролировать ситуацию сбоку от него, он инстинктивно поворачивает голову в нужную сторону – так, чтобы интересующий его объект оказался в передней полуплоскости и вышел из конуса неопределенности [1].

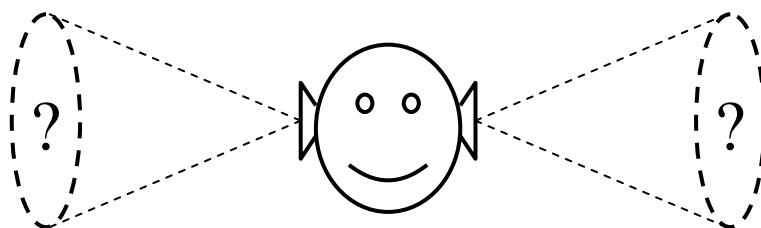


Рис. 2.43. Конус неопределенности

Третьим физическим фактором является **спектральный**, который, по сути, является еще одним проявлением второго фактора – интенсивностного. Поскольку из-за экранирующего влияния головы в спектре сигнала, поступающего к дальнему уху, будет меньше высокочастотных составляющих, то и тембры сигналов, воспринимаемых разными ушами, будут отличаться друг от друга.

Разумеется, спектральный фактор оказывается наиболее эффективным в процедуре локализации, когда сигнал источника звука богат обертонами, т. е. является сложным по составу. Если звуковой сигнал это чистый синус, сформированный с помощью лабораторного генератора, то спектральный фактор будет попросту отсутствовать – при локализации будут работать только первые два фактора: временной и интенсивностный.

Практически все звуки в природе, включая музыкальные и речевые, являются сложными. Поэтому спектральный фактор работает всегда. Особенно эффективен он, когда звук приходит сбоку – под углом $\theta = 90^\circ$ к медианной плоскости головы или вблизи этой величины. Сигнал, поступающий к ближайшему уху, содержит полный спектр источника – как низкочастотные, так и высокочастотные его составляющие. В спектре же сигнала, действующего на дальнее ухо, высокочастотных составляющих будет меньше – прежде всего потому, что на высоких частотах сказывается теневое действие головы. Кроме того, ушные раковины производят сложную фильтрацию звука, зависящую от его частоты, поэтому при отклонениях от перпендикуляра конус неопределенности здесь будет меньше, чем в случае интенсивностного фактора.

Немаловажное значение в процедуре локализации имеет также энергия переходных процессов, причем наибольшее значение здесь имеет наличие в спектре звукового сигнала низкочастотных составляющих.

Минимальная величина углового перемещения источника звука в горизонтальной плоскости, которую способен зарегистрировать человеческий слух, называется *угловой* или *бинауральной, разрешающей способностью слуха*. Величина ее составляет примерно 3° .

Однако разрешающая способность слуха характеризует только его способность замечать перемещение источника. Величина, которая характеризует точность в определении направления на источник звука, называется *точностью локализации*. Ее значение гораздо больше угловой разрешающей способности слуха и составляет примерно 12° , да и то если источник располагается в передней (фронтальной) полуплоскости относительно слушателя. Если источник звуковых колебаний находится сзади, то ошибка в определении направления на него будет еще больше.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ (ВЫСОТНАЯ) ЛОКАЛИЗАЦИЯ

Разрешающая способность слуха при определении угла возвышения источника звука гораздо хуже, чем угловая разрешающая способность в горизонтальной плоскости и составляет $10\text{--}15^\circ$ (в горизонтальной – 3°). В первую очередь это связано с тем, что внешние части органов слуха человека (ушные раковины) расположены по горизонтали. Поэтому способность к вертикальной локализации источника является по сути моноауральной и объясняется только сложной формой ушных раковин и их асимметрией относительно горизонтальной оси, проходящей через слухо-

вое отверстие [9, 11, 14, 25]. Звуковая волна от источника может достигать барабанной перепонки двумя путями: напрямую и после многочисленных отражений от ушной раковины. Ушная раковина действует как фильтр, внося искажения в спектр сигнала, поступающего в слухового проход. В зависимости от угла падения звукового луча в вертикальной плоскости характер таких искажений будет меняться, что и будет характеризовать его величину. Максимальные искажения наблюдаются в полосе частот 6–16 кГц, что объясняется тем, что в этой области прямой сигнал и отраженный не будут совпадать по фазе и в той или иной мере ослаблять друг друга. Характер таких искажений зависит не только от того, под каким вертикальным углом источник звука расположен в медианной плоскости, но также и от того, находится ли он спереди или сзади.

Следует обратить внимание на то, что если звуковые сигналы подавать через стереотелефоны, то ушные раковины оказываются прижатыми к голове и способность слуха к локализации источника в пространстве теряется. Источник звука при этом помещается внутрь головы. Такое состояние для функционирования головного мозга является противоестественным и служит причиной значительной утомляемости людей, которые вынуждены долгое время работать в стереотелефонах. Для того чтобы обеспечить возможность «вынесения» звукового образа из головы и облегчить работу звукорежиссеров, операторов и других специалистов в области обработки звука, были созданы специальные цифровые процессоры, которые производят предварительную фильтрацию сигналов в стереотелефонах, аналогичную той, которую выполняет ушная раковина.

ГЛУБИННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ

Глубинная локализация, так же как и азимутальная, относится к наиболее значимым свойствам человеческого слуха. На ранних стадиях развития человека как вида эти свойства обеспечивали его информацией о том, где и как далеко находится опасное для него животное, от которого надо уходить как можно дальше, или, наоборот, – где и как далеко находится животное, на которое можно охотиться.

Существует четыре основных фактора, обеспечивающих оценку расстояния до источника звука:

- изменение уровня звукового сигнала;
- изменение его спектральных характеристик (тембра);
- личный опыт;
- наличие реверберации в закрытых помещениях.

То, что громкость звучания источника с увеличением расстояния до него уменьшается – факт общеизвестный. Однако субъективные оценки расстояния до источника довольно сильно отличаются от объективных. Объективные измерения звукового давления в свободном поле показывают, что на частотах, при которых источник может считаться точечным, а звуковая

волна – сферической ($\lambda > 5\text{--}15$ м), и при средних расстояниях от источника до измерительного микрофона (1...15 м) увеличение расстояния r в два раза приводит к уменьшению уровня звукового давления p примерно на 6 дБ ($p \sim 1/r$). Эксперт в тех же самых условиях ощутит, разумеется, удаление источника, но его «слуховой образ» будет довольно значительно отставать от источника реального – при условии, конечно, что визуальный контроль отсутствует, т. е. эксперт источника не видит. Эксперименты показали, что ощущение удвоения расстояния до звучащего объекта возникает только при уменьшении уровня звукового давления на 20 дБ (а не на 6 дБ, как при объективном измерении).

При достаточно больших расстояниях от источника до слушателя на глубинную локализацию начинает влиять затухание звука, поскольку высокочастотные составляющие спектра затухают быстрее и тембр сигнала при удалении источника меняется (становится более глухим – «темнеет»). На распространение звука и, как следствие, – на точность глубинной локализации, также оказывают влияние влажность воздуха и направление ветра на открытом пространстве. Следует также отметить, что возможности слуха при определении глубины расположения источника ограничены, имеется «акустический горизонт».

На близком расстоянии (менее 3 м) на точность глубинной локализации начинает оказывать влияние также **дифракция** звуковой волны на ушной раковине и голове, т. е. сказываются разности уровней интенсивностей (выше 1500 Гц) и временные задержки (ниже 1500 Гц), как и в предыдущих случаях. Точность глубинной локализации в этих условиях можно оценить по формуле:

$$L = 2C\Delta T(I_{\text{cp}} / \Delta I),$$

где ΔT – временная разность сигналов, а ΔI – интенсивностная.

Таким образом, при изменении расстояния от слушателя до источника меняются одновременно **громкость и тембр** его звучания, что и служит источником информации для органов слуха при оценке степени его удаления. Общая точность глубинной локализации не очень велика, при смещении широкополосного источника звукового сигнала от 50 до 150 см ошибка в определении расстояния до него составляет, как правило, от 15 до 30 %.

Значимую роль для глубинной локализации играет **личный опыт** слушателя: если источник звука ему знаком, то точность глубинной локализации многократно увеличивается. Например, тембр и динамика обычной человеческой речи, шепота и крика сильно отличаются друг от друга. Поэтому при одной и той же громкости шепота, обычного разговора и крика мы совершенно по-разному будем оценивать расстояние до источника звука: если нормальная слышимость шепота будет означать, что человек находится в нескольких метрах от нас, то слышимость разговора с той же громкостью

будет означать, что говорящий в нескольких десятках метров от нас, а крик с той же громкостью означает, что до кричащего несколько сотен метров.

В закрытом помещении, где вместе с прямым звуком на слушателя воздействует множество его отражений, точность глубинной локализации звукового источника значительно повышается. Отношение энергии прямой звуковой волны к энергии отраженных волн (реверберационных продолжений) при перемещении источника звука по глубине изменяется, что помогает точнее определить расстояние до него. Важнейшее значение имеет также разница между временем прихода прямой звуковой волны и временем прихода первых ее отражений и соотношение этих волн по уровням.

Величину глубинной локализации (расстояния до источника звука) в помещении можно оценить, используя выражение [27]:

$$L = \sqrt{\frac{E_{\text{рев}}}{E_{\text{пр}}}} \cdot \frac{\alpha S}{50(1 - \alpha)},$$

где α – усредненный коэффициент поглощения поверхностей помещения, S – общая площадь этих поверхностей, $E_{\text{рев}}/E_{\text{пр}}$ – отношение энергий отраженных волн и прямой волны, которое называется акустическим отношением.

Обобщая вышесказанное, можно отметить, что слуховой аппарат при определении положения источника звука в трехмерном пространстве использует целый набор различных механизмов обработки звуковых сигналов. Глубокое понимание работы и взаимодействия этих механизмов явилось основой для создания современных систем компьютерного моделирования трехмерных звуковых пространств (систем аурализации). Знание особенностей слухового аппарата широко используется и в процессе разработки современных систем пространственного звучания (Dolby Surround, DTS, SDDS и пр.). Располагая необходимыми знаниями, звукорежиссер получает возможность искусственно формировать звуковую панораму любой конфигурации, соответствующую определенному художественному замыслу, но не существующую в реальной действительности.

2.10.2. Эффект предшествования (эффект Хааса)

Эффект предшествования состоит в том, что если два одинаковых по интенсивности звука приходят к слушателю с разных сторон, то слуховой аппарат человека стремится локализовать источник звука в том направлении, откуда звуковой сигнал поступил первым и игнорирует тот, откуда звук пришел позже. Сказанное справедливо в том случае, если задержка во времени прихода фронта запаздывающей звуковой волны относительно фронта предшествующей не превышает 50 мс. При больших задержках сигнал дальнего источника будет восприниматься как эхо.

Эффект предшествования был известен очень давно, но впервые детально исследован и подробно описан в 1949 г. немецким физиком *Хельмутом Хаасом*. Именно по этой причине он и был назван *психоакустическим законом Хааса* или *эффектом Хааса* [28, 29].

В одном из экспериментов Хааса два громкоговорителя размещались на одинаковом расстоянии от слушателя под углом 45° к осевой линии, проходящей через центр его головы (рис. 2.44). На оба громкоговорителя подавался один и тот же сигнал от источника, однако в сигнал, поступающий на правый громкоговоритель, можно было вводить задержку переменной величины. Когда задержка была равна нулю, то слушателю казалось, что источник звуковых колебаний находится прямо перед ним на осевой линии. Такой фантомный источник называется кажущимся источником звука – КИЗ. При увеличении задержки от 1 до 10 мс КИЗ постепенно перемещался в сторону левого громкоговорителя и, наконец, совмещался с ним. Субъективная громкость звучания при этом увеличивалась. При дальнейшем увеличении задержки от 10 до 30 мс в качестве источника звука воспринимался только левый громкоговоритель – звучание правого громкоговорителя высшими отделами слуховой системы подавлялось, хотя периферическая часть слуховой системы продолжала его слышать. При увеличении задержки от 30 до 50 мс слушатель начинает ощущать присутствие правого громкоговорителя, но направление на источник звука по-прежнему сохраняется в сторону левого громкоговорителя. При увеличении задержки свыше 50 мс звучание распадалось: сигнал правого громкоговорителя воспринимался как эхо левого. Дальнейшие эксперименты позволили установить, что в интервале задержек от 10 до 25 мс человеческий слух игнорирует задержанный сигнал, даже если его уровень превышает уровень первичного сигнала на 4 дБ.

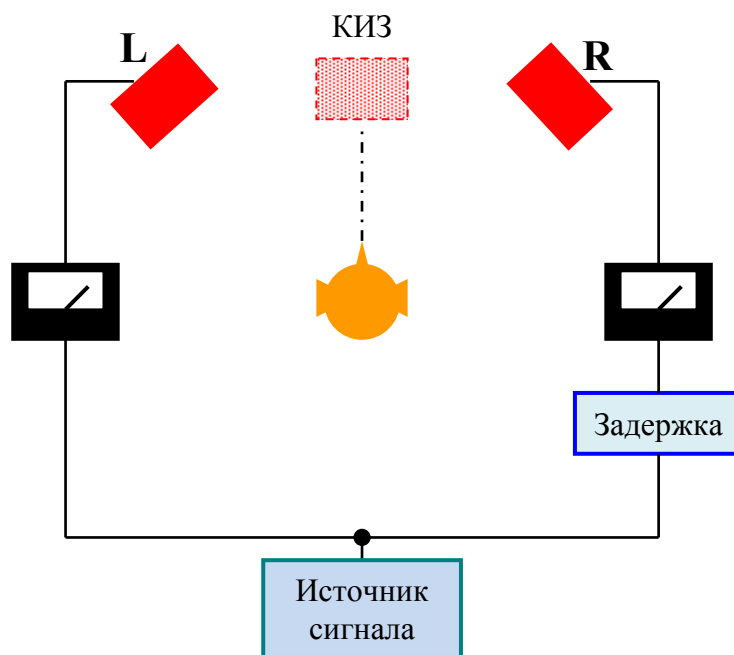


Рис. 2.44. Схема эксперимента Хельмута Хааса

Эффект Хааса учитывают при оценке реверберационной картины в помещениях, где вместе с прямым звуком на слушателя воздействует значительное число вторичных волн, отраженных от его поверхностей. Основным выводом, вытекающим из эффекта предшествования, состоит в том, что человек способен правильно определять направление на источник звука, даже в том случае, если интенсивность прямого и отраженного звука примерно одинакова. Кроме того, установлены еще некоторые закономерности, которые также следует учитывать в работе со звуковыми полями:

- всякий отраженный звук, поступающий к слушателю не позднее 30 мс от прихода прямого, полностью сливается с ним, повышая общую громкость звучания;

- при повышении уровня задержанного сигнала относительно прямого на 10 дБ оба они будут восприниматься как равногромкие;

- локализация источника звука слушателями будет оставаться правильной, если суммарный уровень отраженных сигналов не выше 4 дБ относительно уровня прямого сигнала;

- отражения с задержкой не более 30 мс повышают разборчивость речи, а задержки большей величины при достаточно высоких уровнях могут значительно ее ухудшить.

Эффект Хааса лежит в основе работы декодера системы Dolby Pro Logic. Здесь, в отличие от аналогичного декодера системы Dolby Surround, сигнал, подаваемый на тыловые громкоговорители, задерживается относительно сигнала, подаваемого на фронтальные акустические системы. Таким образом, сигнал, просочившийся в тыловые каналы из фронтальных при декодировании, слушателем не воспринимается, и разделение каналов здесь получается гораздо лучше.

2.10.3. Бинауральное суммирование мощностей

Одним из свойств человеческого слуха является повышение его чувствительности при бинауральном прослушивании (двумя ушами) в сравнении с моноауральным (одним ухом). Эксперименты показали, что если во время прослушивания какой-либо тестовой программы на пороге слышимости закрыть одно ухо, то слуховое ощущение пропадет, и для того чтобы услышать ее вновь понадобится увеличить интенсивность звука на 3 дБ. Было установлено, что величина слуховых порогов при бинауральном восприятии звуковых сигналов в среднем на 3 дБ ниже, чем при моноауральном. Причем проявление этого свойства не зависит от вида сигнала – он может быть как простым синусоидальным, так и широкополосным музыкальным, речевым или шумовым. Это свойство человеческого слуха называется *бинауральным суммированием мощностей*.

Эксперименты, выполненные известным американским ученым и энтузиастом систем пространственного звучания Харви Флетчером, позволили

установить, что при любом уровне мощности источника звучание программы будет в два раза громче, если ее прослушивать двумя ушами (бинаурально) в сравнении с моноауральным прослушиванием.

Кроме того, проведенные исследования показали, что и дифференциальная чувствительность слуха при бинауральном прослушивании гораздо выше, чем при моноауральном: по интенсивности примерно в 1,65 раза, по частоте – в 1,44 раза.

Таким образом, наличие двух приемников звукового сигнала обеспечивает нам возможность слышать более тихие звуки и улавливать более тонкие различия по громкости и частоте.

2.10.4. Бинауральное слияние

Еще одним интересным свойством человеческого слуха является способность объединять сигналы, поступающие в правое и левое ухо. Называется это свойство *бинауральным слиянием*. Строго говоря, сигналы, поступающие в разные уши, почти всегда хоть немного, но отличаются друг от друга – по времени прихода, по интенсивности, по спектру. Тем не менее человек воспринимает всего один слуховой образ. Однако такое объединение наблюдается только когда звуки, поступающие к разным ушам, имеют признаки сходства. Если связь между ними отсутствует, то они будут восприниматься как два отдельных звуковых сигнала. Например, если речевой сигнал разделить по спектру и затем через головные телефоны на одно ухо подать его высокочастотную часть, а на другое низкочастотную, то в высших отделах слуховой системы произойдет их объединение, и человек будет воспринимать один слуховой образ – нормальную разборчивую речь, хотя ни правое, ни левое ухо в отдельности достаточной для распознавания речевого сигнала информации не получает. Если же подать к разным ушам высокочастотные синусоидальные сигналы двух разных частот, то никакого объединения не произойдет – они так и будут восприниматься как разные сигналы. Однако стоит промодулировать эти сигналы каким-либо низкочастотным звуком, как оба они будут восприниматься как единое слуховое ощущение.

2.11. Высота звука

Когда говорят «высота звука» или «высота тона», каждому понятно, о чем идет речь. Но только на интуитивном уровне. Дать же адекватное определение этому общеизвестному термину не так-то просто. Существует несколько определений высоты звука, однако все они страдают некоторой расплывчатостью и вполне исчерпывающим ни одно из них назвать нельзя. Если за основу взять объективную связь между раздражением и ощущением, то определение будет выглядеть следующим образом: «**Высота звука** –

это субъективная количественная мера его ощущения, для которого главным параметром раздражения является частота». Определение можно считать правильным, поскольку высота звука и на самом деле зависит главным образом от частоты звукового стимула. Но также она зависит и от уровня звукового давления, и от формы звуковой волны [1–4, 6, 9, 14].

Среди специалистов часто используется определение, сформулированное в американском стандарте ANSI-S3.20 (1973 г.): «**Высота тона (pitch)** – это атрибут слухового ощущения, в терминах которого звуки можно расположить по шкале от низкого к высокому». Это определение базируется на том факте, что оценка высоты представляет собой субъективную линейную классификацию звуковых сигналов.

Способность к определению высоты звука является одним из важнейших свойств слуховой системы человека, позволяя ему различать и классифицировать все многообразие звуков в окружающем мире. Без этой способности человек был бы лишен возможности воспринимать гармонию в музыке, создавать ее и наслаждаться теми прекрасными мелодиями, которые на протяжении многих веков так украшают нашу жизнь.

Однако способность человека определять высоту звука имеет свои ограничения и распространяется только на периодические сигналы. Если звук представляет собой простое гармоническое колебание (синусоидальный сигнал), то его период T определяет частоту $f = 1/T$, которая и является параметром, определяющим высоту тона.

Если звук сложный, т. е. в его спектре присутствуют две или более частотных составляющих, то высоту такого звука слуховая система может определить по его основному тону. Но возможно это только в том случае, если звуковой сигнал имеет периодическую структуру, т. е. спектр его состоит из гармоник основного тона.

Гармониками называются обертоны, частоты которых находятся в целочисленных отношениях с основным тоном.

Если это условие не выполняется, то слуховая система определить высоту звука не может. Например, звучанию таких музыкальных инструментов, как тарелки, барабаны, кастаньеты и пр. присвоить какой-то определенный тон невозможно.

2.11.1. Высота простых тонов

Еще древнегреческий математик и философ Пифагор, занимаясь поисками музыкальной гармонии, установил, что зависимость высоты звука, который возникает при колебаниях натянутой струны, от частоты этих колебаний имеет существенно нелинейный характер. Впоследствии этим же вопросом занимались такие известные физики, как Гельмгольц, Ом и другие. Многочисленные эксперименты, в ходе которых слушателям предъявлялись звуки различных частот и предлагалось расположить их по высоте, выяснилось, что зависимость эта близка к логарифмической, что полностью

соответствует закону Вебера – Фехнера [19]. Для оценки высоты звука была введена специальная психофизическая единица – *мел* (от древнегреческого слова «мелос» – звук). Ощущаемая высота звука 1000 мел соответствует частоте акустических колебаний 1000 Гц с интенсивностью 40 дБ (или, что то же самое, при уровне громкости 40 фон). При этом высота звука с частотой 20 Гц при уровне громкости 40 фон принимается за 0 мел. Впоследствии (в 1961 г.) Эберхардом Цвиккером была предложена более крупная единица высоты звука – *барк* (по имени немецкого ученого Генриха Георга Баркгаузена); 1 барк = 100 мел.

На рис. 2.45 показан график *психофизической функции* $H = F(f)$, которая иллюстрирует зависимость ощущаемой высоты звука H в мелах от частоты f звуковых колебаний в герцах по логарифмической шкале.

Психофизическими называются такие функции, которые устанавливают связь между числовыми значениями величин двух типов: с одной стороны – это измеренная величина физического стимула, с другой – величина субъективной оценки эксперта (человека) собственной реакции на этот стимул.

В рассматриваемом случае измеренной величиной физического стимула является частота звуковых колебаний источника, а субъективной реакцией на нее – ощущение высоты звука.

Из графика на рис. 2.45 видно, что представленная зависимость линейна только на средних частотах (H (мел) = $\lg f$ (Гц)). Например, при увеличении частоты звуковых колебаний в 3 раза (от 1000 Гц до 3000 Гц) ощущаемая высота звука увеличивается только в два раза (от 1000 мел до 2000 мел). На низких и высоких частотах становится заметной ее нелинейность – что также полностью соответствует закону Вебера – Фехнера.

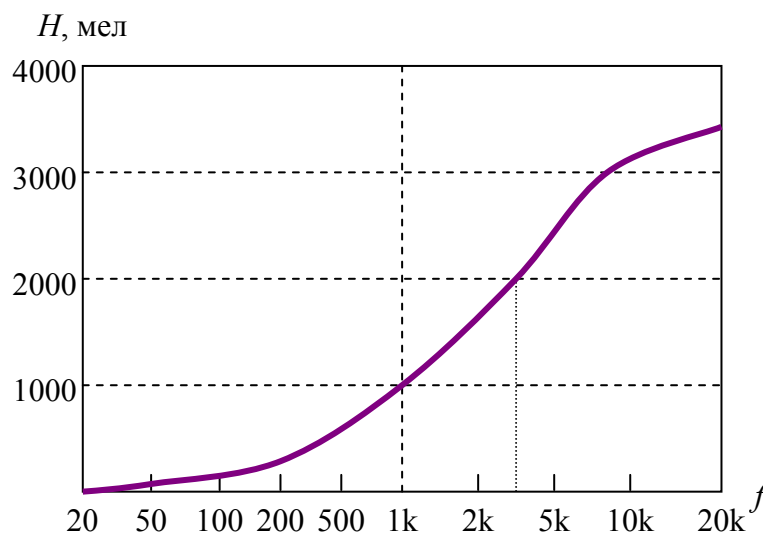


Рис. 2.45. Зависимость ощущаемой высоты тона (в мелах) от частоты звуковых колебаний

Исследования, направленные на определение абсолютных и дифференциальных частотных порогов, позволили установить, что в слышимом диапазоне частот обычный человек с хорошим слухом различает примерно 620 градаций высоты тона – из них ниже частоты 500 Гц примерно 140 градаций, а в диапазоне от 500 Гц до 16 кГц – примерно 480 градаций. Однако встречаются индивидуумы, которые способны различить до 1000 и более градаций [1–6, 14, 18].

Очевидно, что в музыке, особенно западноевропейской, возможности слуховой системы используются далеко не полностью – в инструментах, построенных на основе принятой сегодня равномерно темперированной шкалы, используется не более 96 градаций высоты тона. Попытки увеличить количество таких градаций (в европейской музыке) предпринимались еще в Древней Греции – микроинтервалы существовали и использовались на практике уже тогда. Музыка с использованием интервалов меньше полутона называлась *энармоникой* и использовалась, к примеру, в музыкальном сопровождении трагедий Еврипида «Орест» и «Ифигения», а также (по уверению греческих писателей) в произведениях древнегреческих композиторов Симонида и Пиндара [30–33].

Древнегреческий философ и теоретик музыки Аристоксен Тарентский определял энармонический ряд как самый изысканный и сетовал, что «восприятие едва привыкло к нему с большим трудом». Энармоника считалась «простой и благородной», а хроматика – «неблагородной и пестрой». Однако в эпоху эллинизма энармоника, вероятнее всего, исчезла из регулярного употребления, хотя в теоретических трактатах продолжала обсуждаться вплоть до конца античности как составная часть греческой музыки. К энармонике возвращались в эпоху Возрождения, на рубеже XIX–XX вв. и пытаются вернуться сегодня. В современной науке о музыкальной гармонии системы с интервалами меньше полутона (четвертитоны, третитоны, шестинатоны и др.) получили название *микрохроматических*.

Следует заметить, что в отличие от европейской музыкальной культуры, для классической музыки Востока (индийской *раги*, арабского и турецкого *макама*, азербайджанского *мугама*, таджикского *макома*, индонезийского *гамелана* и др.) использование микрохроматики традиционно и нормативно.

Европейские энтузиасты микротоновой и спектральной музыки пытаются возродить интерес к энармоническому звучанию, используя для этого возможности современных компьютерных технологий. Однако интонирование микроинтервалов и их слышание крайне затруднительно для музыканта, воспитанного в традициях европейской академической музыки. Слух европейца, не подготовленный с помощью особой тренировки, оценивает микрохроматический интервал (даже самый большой из них – четвертитон) не как перемену ступени звукоряда, а как фальшь или как новую окраску «базовой» ступени.

Оценка высоты чистого тона зависит не только от частоты звукового колебания, но и от его интенсивности. Увеличение интенсивности звука приводит к сдвигу ощущения его высоты: низкие звуки при этом кажутся еще ниже, а высокие звуки – еще выше (рис. 2.46). Малозаметно влияние интенсивности только в середине звукового диапазона – в области 1–2 кГц. Однако зависимость эта, к счастью, не очень велика и при исполнении музыкальных произведений, состоящих из сложных звуков, на слух практически незаметна. Иначе при переходе от тихих звуков к громким звуковысотные отношения в ней были бы нарушены.

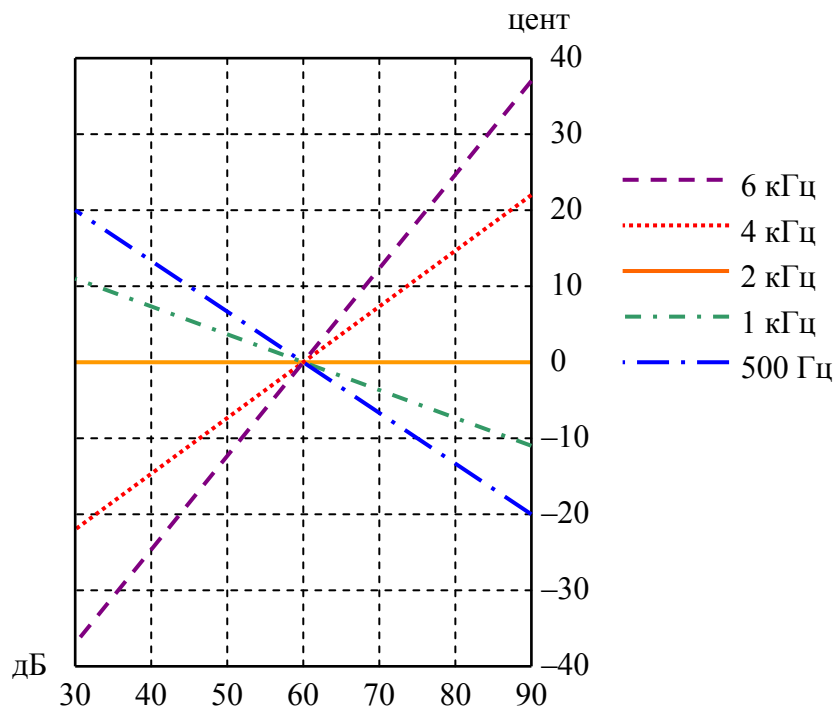


Рис. 2.46. Зависимость высоты звука от его интенсивности

В силу определенной инерционности человеческого слуха для распознавания высоты тона слуховому аппарату необходимо некоторое время. Размер требуемого промежутка времени зависит от частоты звукового сигнала, а также от требуемой точности в определении высоты. Просто услышать звук можно даже при наличии одного-двух колебаний – но такой звук будет восприниматься как сухой щелчок. Если длину фрагмента звукового сигнала увеличить до трех-четырех колебаний, то уже можно понять к какому диапазону частот он принадлежит. Более-менее точное определение высоты тона становится возможным при наличии 8–10 колебаний, а когда таких колебаний 15 и более, то высота тона уверенно распознается большинством слушателей. Например, в области низких частот для этого требуется примерно 60–80 мс, а для частот 1–2 кГц – 10–15 мс.

В том случае, когда требуется распознать разницу в высоте тона у двух подряд следующих звуков разной частоты, действует так называемый **принцип неопределенности**: чем меньше разница по частоте Δf (Гц), тем больше времени надо слуховой системе Δt (с), чтобы распознать различие по высоте тона. Произведение этих величин есть величина постоянная: $\Delta f \times \Delta t = \text{const}$.

2.11.2. Высота сложных звуков

Реальные звуковые сигналы, в том числе музыкальные и речевые, являются сложными по структуре, т. е., кроме основного тона включают в себя целый ряд обертонов. Простые синусоидальные тоны на практике почти не встречаются. Высоту звукового сигнала можно определить в том случае, если он является периодическим, т. е. состоит из основного тона и некоторого количества его гармоник. Высота таких сигналов определяется по частоте основного тона. Если у двух или более звуковых сигналов частота основного тона одинакова, то одинаковой будет и общая высота звука, хотя состав и уровни гармоник у них могут очень сильно отличаться. Если сравнить звучание ноты *ля* первой октавы (основной тон – 440 Гц), извлеченной с помощью скрипки, той же ноты, извлеченной с помощью рояля, трубы и гитары, а также звучание чистого синусоидального сигнала с частотой 440 Гц, полученного с помощью лабораторного генератора, то высота их будет одинаковой, хотя тембры будут кардинальным образом отличаться.

Для определения высоты тона в музыке используются звуки стандартной частоты – **ноты**. Упорядоченные тем или иным способом, ноты образуют **музыкальную шкалу**. Существует несколько различных музыкальных шкал: диатоническая, хроматическая, равномерно темперированная и др. Каждая из музыкальных шкал характеризуется вполне определенными звуковысотными соотношениями между нотами. Эти звуковысотные соотношения называются **музыкальными интервалами**, в число которых входят **октавы, квинты, кварты, терции, тоны, полутоны** и др.

Почти все музыкальные шкалы определены только в полосе частот не выше 5000 Гц. Дело в том, что на частотах выше 5000 Гц связь между частотой тона как физическим параметром раздражения и высотой тона как субъективным параметром ощущения становится неоднозначной. Если для частот ниже приблизительно 5000 Гц удвоение частоты приводит к увеличению высоты тона на октаву (например, переход от ноты *ля* первой октавы к ноте *ля* второй октавы соответствует увеличению частоты от 440 до 880 Гц), то для частот выше 5000 Гц это соответствие нарушается: чтобы получить ощущение увеличения высоты тона на октаву, соотношение частот надо увеличивать в гораздо большее число раз (до 10). Определение высоты тона на частотах выше 5 кГц вообще весьма затруднительно, даже музыканты с абсолютным слухом не могут здесь правильно определить, какая именно нота звучит. Это указывает на существенную разницу в механизмах определения высоты тона до 5000 Гц и выше 5000 Гц.

2.11.3. Физиология восприятия высоты тона

Как уже упоминалось в разд. 2.2.1, для объяснения физиологии восприятия высоты как простых, так и сложных звуков используются две теории: «теория места» и «временная теория».

ТЕОРИЯ МЕСТА

Теория места утверждает, что способность базилярной мембраны выполнять частотный анализ звуковых сигналов основывается на ее «топотописической» организации, т. е. каждый тон имеет свою топографию размещения на ее поверхности. Бегущая волна, возникающая внутри улитки при появлении звукового сигнала, вызывает максимальные смещения базилярной мембраны на тех участках ее поверхности, которые соответствуют его спектральному составу. Волосковые клетки, расположенные на этих участках, изгибаются и вырабатывают электрический сигнал, который по нервным волокнам передается в мозг. Мозг, таким образом, получает информацию о том, какие частоты присутствуют в спектре звукового сигнала. Следует отметить также, что нервные волокна, отходящие от различных участков базилярной мембраны, имеют минимальный порог чувствительности именно к тем частотам, на которых в данном месте возникает максимальное смещение, т. е. своего рода частотно-избирательную настройку [3, 4, 6, 7, 9, 18].

Существует три гипотезы, объясняющие механизм восприятия высоты музыкального звука слуховой системой в соответствии с «теорией места».

Первой была предложена гипотеза, в соответствии с которой слуховая система локализует место фундаментальной частоты и по нему определяет высоту тона. При этом обязательным условием соответствия ощущаемой высоты тона фундаментальной частоте является физическое присутствие энергии на этой частоте (второй закон Ома). Однако в 1940 г. голландский математик Ян Арнольдус Схоутен показал, что если в музыкальном звуке вырезать фундаментальную частоту, оставив ее гармоники, то ощущение высоты тона все равно сохранится [3, 5, 6, 18]. Результат этого эксперимента стал известен как «*феномен пропущенной фундаментальной*».

Дальнейшие исследования привели к появлению *второй* гипотезы, в соответствии с которой слуховая система способна оценивать положение существующих максимумов на базилярной мембране, выбирать среди них те, которые соответствуют одинаковой частотной разнице (т. е. являются высшими гармониками некоторой фундаментальной частоты), и, принимая эту частотную разницу за фундаментальную частоту, определять по ней высоту тона:

$$(n+1)f_0 - (nf_0) = (nf_0) + (1f_0) - (nf_0) = f_0,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

В ходе экспериментов удалось выяснить, что наиболее важную роль в определении высоты тона играют 3-я, 4-я и 5-я гармоники.

Однако и вторая гипотеза оказалась не без недостатков, так как некоторые феномены она не объясняла – например наличие виртуальной высоты тона у колоколов. Тогда была предложена *третья* гипотеза. В соответствии с ней слуховая система находит наибольший общий множитель, который получается при делении всех гармоник на последовательные целые числа, и использует его в качестве базовой величины для определения высоты тона.

Эта гипотеза позволяет объяснить и пропущенную фундаментальную частоту и наличие виртуальных тонов, так как при отсутствии каких-то отдельных гармоник общий множитель все равно остается тем же самым [18].

Объяснение механизма восприятия высоты тона в соответствии с теорией места основано на предположении, что слуховой аппарат «развертывает» ту или иную гармонику, если критическая полоса слухового фильтра, построенного на ней как на центральной частоте, достаточно узкая и соседние гармоники в эту полосу не попадают. Если же соседние гармоники настолько близки по частоте, что попадают внутрь одного и того же слухового фильтра, то развертываться они не будут и с определением высоты тона возникнут сложности. В любом случае для определения высоты тона в соответствии с теорией места слуховому аппарату необходимо и достаточно «развернуть» первые шесть-семь гармоник. Однако вопреки этой теории слуховой аппарат способен с высокой точностью определить высоту тона для звуков, чьи частотные компоненты не развертываются (т. е. звуков с гармониками выше 7-й). Существуют и другие феномены, которые теория места объяснить не в состоянии. В этом случае используют гипотезы и предположения альтернативной теории восприятия высоты тона – «временной».

ВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ

В основе временной теории лежит предположение о том, что при колебаниях базилярной мембраны в нервных волокнах, соединенных с волосковыми клетками, формируются электрические импульсы, которые синхронны смещениям соответствующих им участков мембраны. При смещении некоторого участка мембраны в направлении волосковых клеток они изгибаются, вырабатывая электрический потенциал. При смещении мембраны в противоположную сторону электрический потенциал исчезает. Это явление получило название *эффекта записывания фазы*. Период следования импульсов в каждом отдельно взятом нервном волокне равен периоду колебания звуковой волны: $T_c = 1/f_0$ (Гц). Например, если частота звуковых колебаний равна 500 Гц, то импульсы должны возникать 500 раз в секунду, т. е. с периодом 2 мс.

Механизм распознавания высоты тона, в соответствии с временной теорией, заключается в анализе периодов следования импульсов в разных нервных волокнах, которые отражают форму волны в различных частях базилярной мембраны. При этом мембрана рассматривается как набор полосовых фильтров, ширина полосы пропускания каждого из которых соответствует одной из критических полос слуха. Формы колебаний сигналов, поступающих с выходов этого набора фильтров, будут иметь разный вид. Фундаментальная частота и ее первые гармоники будут иметь синусоидальную форму, поскольку, попадая каждая в свою полосу, будут развертываться индивидуально. Гармоники более высокого порядка развертываться индивидуально не смогут, так как ширина критических полос постепенно увеличивается и, начиная с некоторой частоты, превысит расстояние между соседними гармониками. Теперь в каждую из них будет попадать по меньшей мере две гармоники. При этом между ними возникнут биения с периодом, равным разности частот, т. е. периоду фундаментальной частоты $T = 1/f_0$. В результате периоды огибающих всех колебаний на выходах тех фильтров, где будут наблюдаться биения, будет одинаковым и равным $1/f_0$.

Анализ периодов колебаний на выходе фильтров высших порядков, равных периоду фундаментальной частоты, и периодов синхронных с ней колебаний на выходе фильтров низших порядков, равных периодам первых гармоник, позволит высшим отделам слуховой системы установить истинную высоту тона – что и лежит в основе временной теории.

В современных представлениях о физиологии слухового восприятия высоты тона учитываются как положения аппарата теории места, так и положения аппарата временной теории, поскольку каждый из них имеет и свои достоинства, и свои ограничения. Эксперименты доказывают, что для оценки высоты тона слуховой аппарат человека может использовать два независимых друг от друга, но взаимосвязанных механизма.

2.11.4. Консонанс и диссонанс

Одновременное звучание двух или более тонов может вызывать как приятное слуховое ощущение, так и неприятное, раздражающее. Приятное звучание называют **консонансным** (от французского слова *consonance* – согласие), а неприятное – **диссонансным** (от слова *dissonance* – несогласие). Исследование вопроса консонансности и диссонансности звучания позволило установить, что здесь все зависит от частотных интервалов между отдельными звуками и соотношений их величин с размерами критических полос слуха в данном диапазоне.

Известно, что при наличии двух колебаний с близкими частотами f_1 и f_2 в слуховой системе, как и в любой другой нелинейной системе, происходит их сложение и возникает режим биений (подразд. 2.4.3). На слух такие биения воспринимаются как пульсации громкости тона со средней частотой $1/2(f_1 + f_2)$ и меняющейся амплитудой с частотой $f_1 - f_2$ (рис. 2.47).

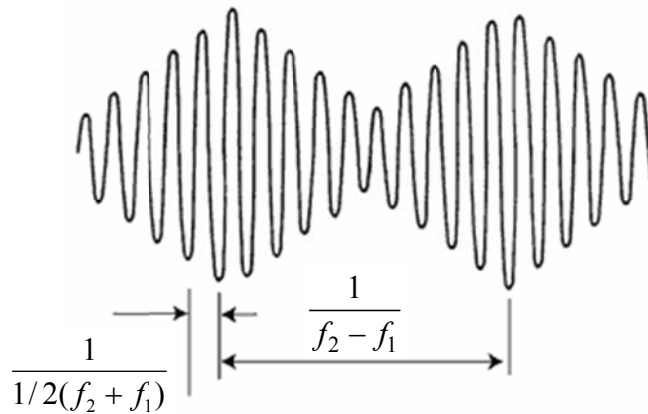


Рис. 2.47. Пример биений

При совпадении частот два тона будут звучать в унисон. Если частоту одного из тонов увеличивать, то вплоть до разницы примерно 15 Гц будет прослушиваться один тон средней частоты с изменяющейся громкостью – биения. При дальнейшем увеличении разницы частот начинают прослушиваться оба тона, но с сильной шероховатостью звучания (диссонанс). Однако когда разница частот превысит размер критической полосы – шероховатость исчезнет и звучание станет консонансным.

Установлено, что на средних частотах наиболее сильная шероховатость звучания прослушивается, когда разность частот составляет около полутона – например на частоте 500 Гц $\Delta f/f = 0,06$. На частотах ниже 200 Гц и выше 4000 Гц эта разница составляет более одного тона – $\Delta f/f = 0,12$. Частота, на которой начинают прослушиваться два тона с сильной шероховатостью, называется «частотой перемешивания». Свойством появления хорошо прослушиваемых биений на частоте перемешивания, кратной полутону, пользуются для настройки музыкальных инструментов [32, 34].

Исследованием связи ощущения консонансности и диссонансности между двумя чистыми тонами занимались голландские ученые Пломп и Левельт. Проведенные ими эксперименты с участием большого числа слушателей, не являющихся профессиональными музыкантами или экспертами, позволили выявить следующие закономерности:

- если два тона имеют одинаковую частоту колебаний, то они звучат в унисон и такое звучание является консонансным;
- если разница частот больше, чем критическая полоса, то звучание тоже будет консонансным;
- если разница частот составляет от 5 до 50 % ширины критической полосы, то звучание будет диссонансным;
- наиболее диссонансным звучание будет в том случае, когда разница частот окажется равной четверти критической полосы.

Указанные закономерности относятся не только к фундаментальным частотам музыкальных тонов, но и к гармоникам сложных сигналов. Биения между ними также способны влиять на ощущение консонансности и

диссонансности, однако значимую роль здесь, как и при определении высоты тона, играют только первые 6–7 гармоник, поскольку именно они, как правило, имеют наибольшую амплитуду.

Обработка результатов, полученных Пломпом и Левельтом, позволила отобразить графически степень ощущения консонансности и диссонансности совместного звучания двух тонов (рис. 2.48), используя следующие допущения. Максимальной приятности звучания ставится в соответствие значение консонанса, равное 1, а минимальной – 0. Аналогично, наибольший диссонанс обозначается цифрой 1, наименьший – 0. Анализ графика дает возможность сделать дополнительные уточняющие выводы:

- если две гармоники имеют одинаковые частоты или разница между ними не превышает 5 %, то ощущаемое звучание квалифицируется как «совершенный консонанс» и обозначается буквой **C**;
- если разница между частотами гармоник больше критической полосы, то это также консонанс, хотя и не попадающий под определение «совершенный»; обозначается такой консонанс буквой **c**;
- если разница между частотами гармоник меньше критической полосы, то это диссонанс, обозначаемый буквой **d**;
- если разница между частотами гармоник меньше половины ширины критической полосы, то ощущаемое звучание квалифицируется как «совершенный диссонанс» и обозначается буквой **D**.

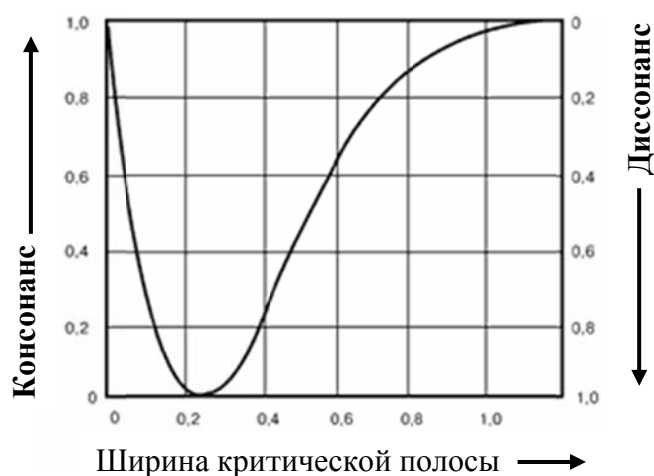


Рис. 2.48. Графическое отображение зависимости ощущения консонансности или диссонансности звучания интервалов между двумя чистыми тонами в зависимости от ширины критической полосы

Следует отметить, что поскольку ширина критических полос с частотой увеличивается, то два тона, звучание которых консонансно в одной октаве, могут звучать в другой октаве значительно менее консонансно или даже вовсе диссонансно. Об этом следует помнить при аранжировке музыкальных композиций и при компьютерной обработке звука.

2.12. Тембр

Два или более звуков одинаковой высоты и громкости, но извлеченные с помощью разных музыкальных инструментов или пропетые разными вокалистами, будут отличаться друг от друга. Этот факт известен каждому и уже отмечался в подразд. 2.11.2. Характеристика, выражающая это отличие, называется **тембром** (от французского слова *timbre*) или **окраской тона**. В англоязычной литературе иногда используется определение *tone quality* (**качество тона**) [18, 35].

Тембр – это чисто субъективная характеристика звука, благодаря которой можно легко опознать голоса говорящих и звучание различных музыкальных инструментов – правда, лишь в том случае, если слушателю они уже хорошо знакомы, и основные признаки их звучания хранятся у него в долговременной памяти. При этом процесс опознания обладает определенной инвариантностью – знакомый тембр опознается даже при наличии существенных искажений: голос знакомого человека мы можем опознать даже издали, хотя тембр его голоса будет в этом случае не совсем таким, как если бы этот человек находился в непосредственной близости от нас.

Несмотря на то, что дать строгое определение такой сугубо субъективной характеристике как тембр чрезвычайно сложно, попытки такие все же делаются. К примеру, в американском стандарте ANSI-S3.20 приведено следующее определение: «Тембр – это атрибут слухового восприятия, который позволяет слушателю определить, что два звука, имеющие одинаковую высоту и громкость, отличаются друг от друга».

Еще большие сложности возникают при попытке дать словесное описание тому или иному тембру звучания. Если высота звука или громкость, которые также являются субъективными характеристиками, поддаются хотя бы количественной оценке и на основании этого уже можно придумать для них такие же субъективные единицы измерения (мелы, барки, фоны, соны), то тембр – характеристика сугубо качественная. Оценить ее количественно нельзя даже субъективно. Поэтому среди специалистов принято оценивать тембр путем добавления прилагательных, в той или иной мере отражающих ощущения слушателя. Поскольку ощущения слушателя всегда субъективны, то и прилагательных, с помощью которых описывают тембр разные люди, известно великое множество. Некоторые из этих терминов, кроме всего прочего, являются синонимами. Так что рассматривать все эти прилагательные можно только не более как перечень слов, которые когда-либо кем-либо употреблялись для оценки тембра звучания. Приведем для примера некоторые из них.

Arching – суровый

Bright – яркий

Buzzy – жужжащий

Carrying – полетный

Fat – жирный

Frosty – морозный

Gentle – нежный

Husky – сиплый

Clear – ясный	Inexpressive – невыразительный
Coarse – грубый	Limpid – прозрачный
Cold – холодный	Luminous – блестящий
Cutting – резкий	Lush – сочный
Dark – темный	Melancholy – меланхоличный
Dense – плотный	Nasal – носовой
Diffuse – рассеянный	Noble – благородный
Dry – сухой	Ringing – звенящий
Dull – скучный	Sinister – зловещий

Несмотря на то, что тембр – характеристика субъективная, факторы, влияющие на него, являются вполне объективными. Это спектральный состав звукового сигнала, его громкость, временные характеристики и пр. Рассмотрим некоторые из них.

2.12.1. Спектр звукового сигнала и тембр звучания

Спектр звукового сигнала является наиболее значимым фактором, определяющим тембральную окраску звука. Это отмечал в своих трудах еще в 1877 г. Гельмгольц: *«Разница в музыкальном качестве тона (тембре) зависит только от присутствия и силы парциальных тонов (обертонов) и не зависит от разницы фаз, с которой эти парциальные тоны вступают в композицию»*. Правда, вторая часть этой фразы – относительно разницы фаз оказалась ошибочной, но это выяснилось только спустя столетие [36]. Что же касается спектра, то здесь Гельмгольц оказался прав, и последующие исследования полностью подтвердили его выводы.

Реальные звуковые сигналы – как музыкальные, так и речевые, представляют собой нестационарные случайные процессы – текущие значения амплитуды, частоты и фазы акустических колебаний непрерывно меняются во времени, поэтому изучение их характеристик весьма затруднительно. Для получения спектральных характеристик звучания отдельных инструментов пользуются методом усреднения по времени: выделяют некоторый конечный участок в стационарной части сигналаграммы и внутри этого участка производят расчет спектра. Такие спектры достаточно точно характеризуют индивидуальные особенности звучания инструментов, отражая механизм звукообразования в нем. Кроме основного тона, спектры звучания музыкальных инструментов содержат его гармоника, а также могут содержать другие обертоны (тональные компоненты, не кратные основному тону) и шумоподобные составляющие. Состав всех этих компонент, а также их величины и определяют тембр звука.

Спектры речевых сигналов (человеческих голосов) также обладают индивидуальными чертами, характерными для каждого человека, что и позволяет нам отличать голос одного человека от голоса другого.

Тембральная окраска звучания музыкальных инструментов зависит от характера звучащего тела, наличия или отсутствия резонатора, его формы и материала, из которого он изготовлен, механизма звукоизвлечения и т. п. На спектры звучания инструментов, принадлежащих к одному классу (струнные, духовые, ударные), одни и те же факторы оказывают сходное влияние. Например, количество обертонов в спектрах звучания струнных музыкальных инструментов зависит от высоты основного тона: чем он выше, тем обертонов меньше. Спектры звучания ударных инструментов сильно зависят от места, по которому производится удар – по центру мембраны или ближе к ее краю. Похожая картина наблюдается при изменении места возбуждения струны у щипковых и смычковых инструментов.

Резонатором у флейты и кларнета служит цилиндрическая труба. Но у флейты она открыта с обоих концов, поэтому в ее спектре содержатся все четные и нечетные гармоники, правда, амплитуда этих гармоник быстро уменьшается с частотой, и обертоны в мягком и нежном звучании флейты почти не ощущаются. У кларнета тоже используется цилиндрический резонатор, но закрыт он только с одного конца, поэтому в его спектре присутствуют в основном нечетные гармоники и звучание его в низких регистрах глуховатое, а в высоких – резкое, даже свистящее. В спектрах медных инструментов много высокочастотных гармоник, поэтому они отличаются ярким и резким тембром звучания.

Поиску связей между структурой спектра звукового сигнала и характером его звучания было посвящено немало исследований в течение последнего столетия. Появление современных компьютерных технологий значительно расширило инструментарий исследователей и кардинально облегчило решение задачи, поэтому многие закономерности в этой области уже установлены [37]:

- прежде всего, подтвердился интуитивно уже давно принятый за истину факт, что отсутствие или недостаток обертонов, особенно в нижнем регистре, приводит к обеднению звучания – звук становится скучным, тусклым и пустым, как сигнал от лабораторного генератора низкой частоты;

- присутствие в спектре первых пяти-семи гармоник с достаточно большой амплитудой придает тембру звучащего инструмента полноту и сочность;

- если первые пять-шесть гармоник ослабить, а более высокие – усилить, то тембр станет резким и скрипучим;

- уменьшая уровень сигнала в области низких частот и увеличивая в диапазоне 1...5 кГц, можно повысить субъективно воспринимаемую четкость и разборчивость речи и вокала;

- подъем частотной характеристики в области 100...250 Гц делает вокал гулким и «грудным»;

- подавление частот в диапазоне 150...500 Гц приводит к тому, что голос начинает звучать «как в трубе» – открыто и пусто;

- провалы отдельных участков спектра в диапазоне 500...1000 Гц делают голос жестче, а подъемы в области 1 и 3 кГц придают вокалу «металлический» оттенок;
- подавление участков спектра в области 2...5 кГц делает голос вялым, безжизненным и неразборчивым;
- усиление частот 4...10 кГц приводит к «искристости» и яркости голоса;
- плавный подъем огибающей (т. е. увеличение амплитуд определенной группы обертонов) в области 200–700 Гц дает возможность получить оттенки сочности, глубины;
- подъем в области 2500–3000 Гц придает тембру полетность, звонкость, а в области 3000–4500 Гц – резкость, пронзительность.

2.12.2. Влияние уровня громкости на тембр звучания

Тембральная окраска звука в немалой степени зависит от громкости звучания источника акустических колебаний. Причина здесь та же, что и в предыдущем случае – изменение спектрального состава воспринимаемого на слух звукового сигнала.

Прежде всего, при увеличении общего уровня громкости начинают прослушиваться те гармоники основного тона и прочие обертоны, которые при тихом звучании были не слышны, поскольку их уровни были ниже порога слышимости (подразд. 2.5.1 – кривые равной громкости). Это касается обертонов, которые располагаются на краях слышимого диапазона – там, где чувствительность слуха значительно ниже, чем в области средних частот. Тембр звучания становится значительно полнее и богаче. Наиболее полным и естественным звучание будет при уровне громкости 90–92 дБ, поскольку это совпадает с нормальным уровнем звучания большинства музыкальных инструментов. По этой же причине запись музыкальных программ стараются производить именно при уровне громкости 90–92 дБ.

Однако дальнейшее увеличение уровня громкости приведет к ухудшению тембра. Прежде всего, из-за искажений, которые будут возникать в источниках звуковых сигналов, поскольку при увеличении амплитуды колебаний вибраторов различных инструментов (струн, мембран и пр.) начинают проявляться нелинейные эффекты. Кроме того, искажения появятся и в самой слуховой системе человека.

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: наиболее выигрышным звучание музыки будет при исполнении ее в нижних регистрах – тогда обертоны будут попадать в область наивысшей чувствительности слуха и звучание будет богатым и наполненным. Если же мелодию транспонировать в область более высоких частот, то значительная часть обертонов попадет в диапазон выше 15–20 кГц, и ее звучание обедняется, так как в этой области слуховые пороги значительно выше и высокочастотные обертоны станут неслышимыми.

2.12.3. Влияние временных характеристик звукового сигнала на тембр звучания

Слуховая система человека обрабатывает звуковой сигнал не только в частотной области (анализ спектра), но и во временной. Поэтому еще одним физическим фактором, определяющим тембр звучания, является временная структура звукового сигнала и, в первую очередь, – форма и длительность переходных процессов: атаки (нарастания) и затухания.

Первые попытки создания электронных музыкальных инструментов, имитирующих звучание реальных (фортепиано, скрипки, духовых и пр.), предпринимались еще в 60-е гг. прошлого века. Для этого физики в полном соответствии с классической теорией тембра, основы которой казались тогда незыблемыми, скрупулезно исследовали спектр звучания инструмента в стационарной фазе, а затем синтезировали звуковой сигнал с точно таким же спектром электронными методами. Однако попытки эти потерпели неудачу: тембр полученного звукового сигнала оказался совершенно не похож на звучание реального инструмента. Примерно такая же история произошла и с попытками синтеза голоса. Только появление и развитие вычислительной техники, позволившей установить связь между тембральной окраской звука и временной структурой звукового сигнала, помогло приоткрыть завесу тайны над этим казавшимся необъяснимым феноменом.

Оказалось, что и каждый музыкальный инструмент, и человеческий голос обладают особой системой звукообразования, которая определяет как характер временной структуры звукового сигнала, так и динамику его изменения. Первое же сопоставление временной структуры звуковых сигналов, формируемых различными инструментами, показало, что у всех инструментов она принципиально разная. Основные части процесса звучания – атака, стационарная часть и спад у всех инструментов различаются как по продолжительности, так и по форме. Кроме того, структура сигнала в его стационарной части (усредненный спектр, которой, являясь основой классической теории тембра, стал причиной неудачи в первых опытах по синтезу звучания музыкальных инструментов) также непрерывно изменяется, и динамика этих изменений весьма ощутимо влияет на слуховое ощущение.

Проведенные эксперименты показали, что если поменять местами атаку и спад в структуре сигнала звучания какого-либо музыкального инструмента (проиграть в обратном направлении), то опознать его тембр станет практически невозможно. То же самое произойдет, если удалить фрагмент звукового сигнала, соответствующий атаке, или атаку одного инструмента заменить атакой другого. Следовательно, принципиально важными элементами для распознавания тембра звучания инструмента являются не только стационарная часть звукового сигнала, но также его атака и период затухания (спад).

Атака звукового сигнала представляет собой процесс «развертывания» обертонов, который является характерным для каждого музыкального инструмента. Обертоны в звучании каждого из них появляются в строго определенном порядке, через определенные интервалы времени и имеют разную амплитуду. Характер появления обертонов, воспринимаемый слуховым аппаратом как расширение спектра, вероятно, и служит одним из главных признаков распознавания тембра звучания. Продолжительность атаки у большинства музыкальных инструментов составляет несколько десятков миллисекунд.

Например, в звучании *кларнета* доминируют нечетные гармоники 1 : 3 : 5, при этом третья гармоника появляется в спектре на 30 мс позже первой, затем постепенно «разворачиваются» более высокие гармоники.

Звучание *гобая* отличается короткой атакой – гармоники развертываются быстро, но порядок их появления совсем не соответствует номерам: первыми развертываются вторая и третья гармоники, затем четвертая и только через 8 мс начинает появляться первая (фундаментальная) гармоника.

У *флейты* атака довольно продолжительная: вначале появляется только первая гармоника, а все остальные начинают развертываться лишь спустя 80 мс.

Звучание *трубы* также отличается короткой атакой: первые семь гармоник появляются практически одновременно – в течение первых 10 мс, затем быстро разворачиваются все остальные.

У *тромбона* первой появляется вторая гармоника, затем первая и через 10 мс третья и четвертая.

У *тубы* и *валторны* вся энергия сконцентрирована в первых трех гармониках, высшие гармоники практически отсутствуют.

На процесс распознавания музыкального инструмента оказывают влияние также разнообразные побочные призвуки: начальный скрип смычка у скрипки и виолончели, начало ноты на медном духовом инструменте, начальное похлопывание язычка, глухой ударный звук молоточка у фортепиано и рояля, небольшая дисгармония обертонов и прочие акустически признаки, помогающие идентифицировать инструмент.

2.12.4. Влияние на тембр звучания фазовых соотношений между обертонами

Утверждение Гельмгольца относительно зависимости тембра только от состава и амплитуд спектральных составляющих звукового сигнала, приведенное в начале подразд. 2.12.1, стало причиной того, что почти столетие исследователи даже не пытались рассматривать влияние на него каких-либо других факторов. Авторитет Гельмгольца среди ученых чрезвычайно высок и никому из них даже в голову не приходило, что и он может иногда ошибаться. Только в 1976 г. в работах Р. Пломпа [36] было показано,

что ухо отнюдь не страдает «фазовой глухотой» и восприятие тембра зависит как от амплитудного спектра (в первую очередь от формы огибающей спектра), так и от фазового спектра.

Установлено, что фазовые соотношения оказывают слышимое влияние на определение высоты тона: когда все обертоны музыкального тона находятся в фазе, точность определения высоты тона увеличивается, если фазовые соотношения между гармониками имеют случайный характер, то точность определения высоты тона ухудшается. Поскольку тембр определяется восприятием совокупности тонов различной высоты, то следует ожидать, что причины, оказывающие слышимое влияние на высоту этих тонов, будут также влиять и на тембр. Эксперименты, проведенные с помощью синтезированных сигналов, полностью подтвердили это предположение: при изменении фазовых соотношений между составляющими обертонами тембр звучания также заметно изменялся [38, 39].

При наличии реверберации сложный звук с высокой степенью регулярности фазовых соотношений говорит о близости источника звука, поскольку по мере удаления от него фазовые соотношения приобретают все более случайный характер за счет отражений в помещении. По этой причине оценка звучания в немалой степени зависит от того, где располагается слушатель: рядом с исполнителем, где-то в середине зала или у его задней стены. По той же причине тембр звучания записанной фонограммы будет зависеть от того, где и как располагались микрофоны: чем ближе к источнику находится точка записи, тем выше будет регулярность фаз между обертонами и тем более четкой получится высота тона, чем дальше – тем более ровным будет тембр и менее четкой высота

2.13. Музыкальные шкалы и интервалы

Известно, что в пределах слышимого диапазона человеческий слух способен различать примерно 620 градаций высоты звука. Однако в музыке принято использовать существенно меньший набор звуков. Например, шкала частот, используемого уже более 300 лет равномерно темперированного строя, включает в себя только 108 звуков стандартной высоты (9 октав по 12 полутонов в каждой). Реально же их используется еще меньше – клавиатура фортепиано, к примеру, имеет только 90 клавиш.

Упорядоченный тем или иным способом набор звуков, используемых для создания музыки, называется *музыкальной шкалой*, *музыкальным строем* или *звукорядом* [3, 18, 35, 40, 41, 42]. Способы упорядочения звуков много раз изменялись на протяжении всей истории развития музыкального искусства, поэтому известно несколько музыкальных шкал достаточно долгое время использовавшихся в практике музицирования. Например, в европейской музыкальной культуре наиболее известными являются пифагорейская,

чистая (или натуральная) и равномерно темперированная шкалы. В основе отбора звуков для музыкальной шкалы лежит стремление получить из них как можно большее число консонантных созвучий. Это стремление отражено в определении музыкальной шкалы, которое сформулировал известный ученый-психоакустик Редерер в своей книге «Физика и психофизика музыки»: «Музыкальная шкала – это дискретная последовательность тонов (высот), организованная таким образом, чтобы получить максимально возможное число консонантных комбинаций, когда две или более нот из этой последовательности звучат одновременно» [35].

Для объяснения, почему при создании музыки принято использовать конечный набор звуков вполне определенной высоты, а не скользящие тоны, существуют две категории гипотез: физические и психофизические. Последние основываются том, что процесс обработки звуков в слуховой системе обладает определенной инерционностью – для распознавания высоты требуется примерно 15–60 мс, а для распознавания тембра – 200 мс. Кроме того, высшим отделам головного мозга легче обрабатывать, идентифицировать и сохранять в памяти мелодию, состоящую из временной последовательности дискретных высот, которые находятся в определенных соотношениях друг с другом, поскольку это увеличивает возможности для сравнения с уже записанными в памяти образцами мелодий. Однако такие соображения трудно считать убедительными, поскольку человек прекрасно распознает, запоминает и воспроизводит как дискретные, так и скользящие тоны, которые достаточно часто присутствуют и в голосах вокалистов, и в звучании многих музыкальных инструментов: струнных, духовых (тромбон, например) и современных электронных.

Более убедительной выглядит гипотеза другой категории – вполне практическая, в соответствии с которой необходимость поиска подходящего дискретного набора частот для создания музыки вызвана ограниченными физическими возможностями целого ряда музыкальных инструментов, вибраторы которых способны формировать звуки только одной высоты и по этой причине требующие предварительной настройки высоты своего звучания: струны щипковых и клавишных инструментов, трубы духовых инструментов, бруски, стержни и трубки идиофонов и пр.

2.13.1. Музыкальные интервалы и интервальные коэффициенты

Известно, что одним из первых проблемой выбора подходящего набора частот для создания музыки и поиска системы консонансных музыкальных интервалов занимался древнегреческий математик и философ Пифагор (VI в. до н. э.). Однако музыка и музыкальные инструменты существовали задолго до Пифагора и не только в Древней Греции. В 2004 г. в горах Германии была найдена флейта, изготовленная из слоновой кости. Возраст ее

оценивается примерно в 30–33 тыс. лет [43]. Ранее находили и другие похожие на нее инструменты, но более позднего времени. Слоновая кость, судя по всему, считалась наиболее удобным материалом для изготовления духовых инструментов. А словенские палеонтологи обнаружили флейту, изготовленную из обломка бедренной кости пещерного медведя, возраст которой еще больше – не менее 45 тыс. лет (рис. 2.49). Инструмент имеет два отверстия для пальцев, расположенных на одной линии, на расстоянии около трех с половиной сантиметров друг от друга, и еще два отверстия: для вдвухания воздуха и его выхода [44]. Предположив, что это целый инструмент, а не обломок, исследователи пришли к выводу, что на нем можно было сыграть четыре ноты – *ми*, *фа*, *соль* и *си-бемоль* (или *ля*). Сейчас невозможно установить, сознательно ли древний музыкант подбирал высоту звучания своего инструмента или просто у него так получилось. Скорее всего, последнее. Эту флейту считают самым древним музыкальным инструментом на земле.

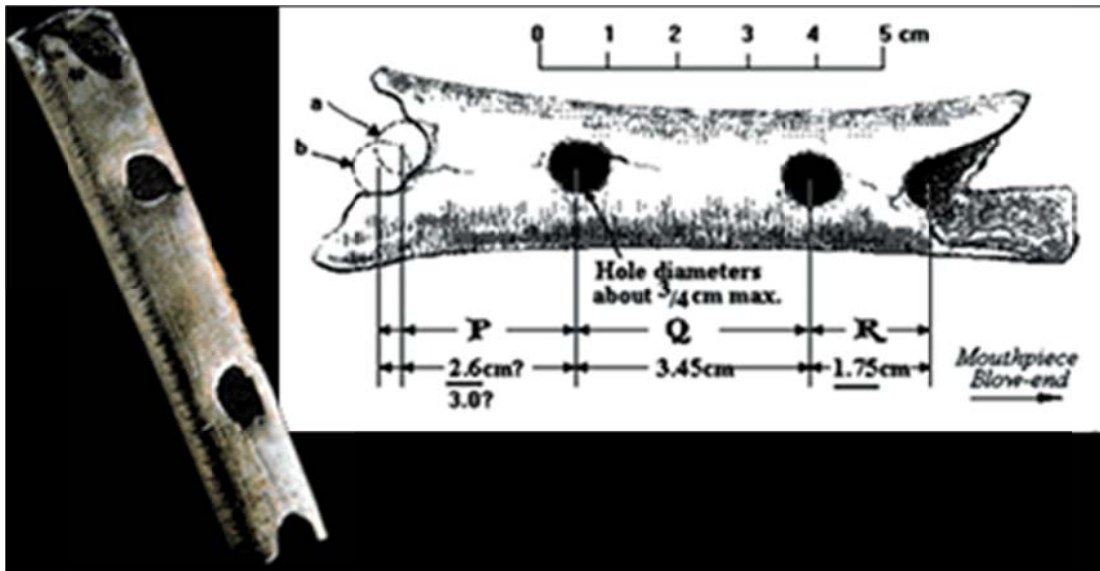


Рис. 2.49. Древнейшая из найденных на земле флейт, изготовленная неандертальцами примерно 45 тыс. лет назад

Хотя здравый смысл подсказывает, что ударные инструменты должны были появиться еще раньше. Просто предметы, которыми стучали, и то, по чему стучали, вероятнее всего не имели какой-то характерной формы, по которой их можно опознать как музыкальные инструменты, в отличие от флейты. Можно также предположить, что и флейты или дудочки из менее стойких материалов (тростник, дерево) тоже появились раньше костяных, но не дожили до сегодняшнего дня. Такие инструменты проще изготовить и подстроить высоту их звучания. Наверняка, в те времена, когда человек начал осознанно мастерить музыкальные инструменты, пытаясь добиться нужного звучания, технология и материалы, используемые для этого, допускали возможность настройки инструмента. Следовательно,

должны были появиться и какие-то музыкальные интервалы, обеспечивающие создание желаемой мелодии, а также повторяемость исполнения этой мелодии на разных инструментах. И здесь с определенной долей уверенности можно предположить, что без основного музыкального интервала – октавы, т. е. музыкального интервала, в котором частота верхнего тона в два раза выше частоты нижнего тона, тут не обошлось. Октава – интервал, безусловно, консонантный, поскольку это одна и та же нота. Говоря языком физики, верхняя нота октавы – это вторая гармоника нижней. Поэтому консонантность октавы обусловлена как законами физики, так и законами физиологии слуха.

Любое звучащее тело (вибратор), кроме основной частоты f_0 , генерирует еще и бесконечное число ее гармоник: $2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, 6f_0, \dots 32f_0, \dots$. Получается одновременно звучащий аккорд, состоящий из основной частоты и всех ее высших гармоник. Однако на слух воспринимаются только ограниченное число первых гармоник. Во-первых, из-за того, что амплитуда высших гармоник быстро убывает (правда, у разных инструментов по-разному) и их уровни в конце концов оказываются ниже кривой абсолютной слышимости. Во-вторых, высшие гармоники просто не попадают в слышимый диапазон частот, ограниченный значениями 16–20 кГц. Впрочем, в силу особенностей обработки звуков на базилярной мембране, реальное значение для восприятия тембра имеют только первые 15–17 гармоник, поэтому наличие или отсутствие гармоник более высоких порядков все равно ни на что уже не влияет.

Однако не только интервал между второй гармоникой и первой (октава), но и другие интервалы между гармониками также используются в музыке и имеют свои названия [18]. Перечислим основные из этих интервалов:

- 2 : 1 – октава;
- 3 : 2 – квинта;
- 4 : 3 – кварта;
- 5 : 4 – большая (мажорная) терция;
- 6 : 5 – малая (минорная) терция;
- 7 : 6 – узкая малая (бемоль-минорная) терция;
- 8 : 7 – широкая большая (диез-мажорная) секунда;
- 9 : 8 – большой (мажорный) целый тон;
- 10 : 9 – малый (минорный) целый тон и т. д.

Стоит отметить, что отношения частот для интервалов между несмежными гармониками тоже представляют собой музыкальные интервалы: например, интервал между четвертой гармоникой и первой 4 : 1 – две октавы, между девятой и шестой 9 : 6 – квинта и т. д.

Отношение частот, соответствующее каждому музыкальному интервалу, называется его *интервальным коэффициентом*.

Интервальные коэффициенты используются для определения тех музыкальных интервалов, которые представляют собой комбинации перечис-

ленных выше. Правила расчета здесь следующие. Чтобы сложить два интервала, их интервальные коэффициенты надо перемножить, а чтобы вычесть один из другого, интервальный коэффициент уменьшаемого надо разделить на интервальный коэффициент вычитаемого.

Например, если сложить квинту и кварту, то в сумме получится октава: $(4 : 3) \times (3 : 2) = 2 : 1$. Если вычесть из квинты малую терцию, то получится большая терция: $(3 : 2) / (6 : 5) = 5 : 4$.

Теперь следует обратить внимание на следующий факт. Если расположить гармоники какой-либо частоты на линейной и логарифмической шкале частот (рис. 2.50), то можно увидеть, что на линейной шкале расстояния между гармониками одинаковые, а на логарифмической – прогрессивно уменьшаются. Если вспомнить о том, что в соответствии с законом Вебера–Фехнера высота тона воспринимается пропорционально логарифму частоты, то можно сделать вывод, что и музыкальные интервалы на слух воспринимаются в соответствии с их расстояниями на логарифмической шкале частот. То есть если взять на логарифмической шкале частот интервал в одну октаву, то он будет соответствовать точно такому же интервалу в одну октаву на любом участке диапазона частот. Например, октава с отношением частот $500 : 1000$ и октава с отношением частот $2000 : 4000$ будут восприниматься одинаково, хотя вторая октава в линейной шкале больше первой в четыре раза (рис. 2.51). Таким образом, *логарифмическое представление интервалов на шкале частот соответствует слуховому механизму анализа высоты музыкального тона.*

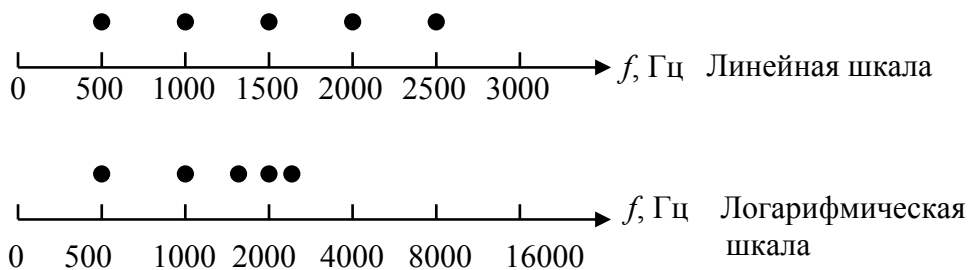


Рис. 2.50. Расположение первых пяти гармоник частоты 500 Гц на линейной и логарифмической шкалах

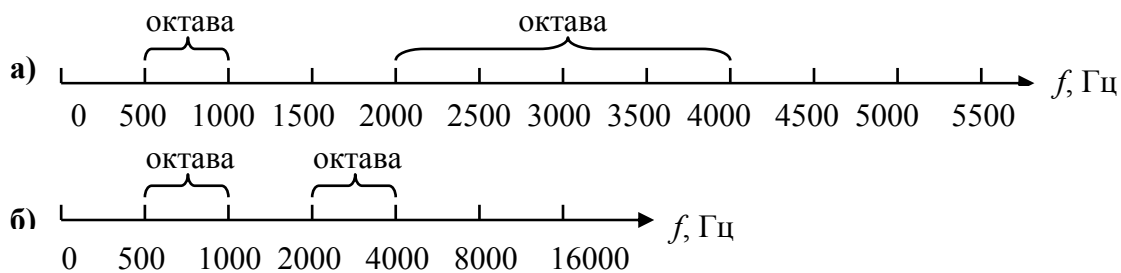


Рис. 2.51. Октавы на линейной (а) и логарифмической (б) шкалах

Используя эти закономерности, можно легко определить, сколько октав (квint, кварт или других интервалов) содержится внутри диапазона с любым соотношением частот. Если интервальный коэффициент заданного диапазона $S = f_B/f_H$, то чтобы определить, из какого количества n октав он состоит, надо умножить интервальные коэффициенты октав n раз $(2 : 1)(2 : 1) \dots = S$ или $2^n = S$. Если прологарифмировать обе части этого равенства, то получим искомое значение n :

$$\lg S = n \lg 2 \quad \text{или} \quad n \approx 3,322 \lg f_B / f_H.$$

Той же закономерностью можно пользоваться и для расчета любых других интервалов (квint, кварт и пр.):

$$n = \frac{1}{\lg k} \lg \frac{f_B}{f_H},$$

где k – интервальный коэффициент требуемого интервала.

Например, если необходимо определить количество квint, содержащихся в некотором диапазоне частот S , надо использовать интервальный коэффициент квintы $k = 3/2$, если нужно определить количество кварт, то надо взять интервальный коэффициент кварты $k = 4/3$ и т. п.

2.13.2. Принципы построения музыкальных шкал

Сейчас невозможно узнать кто и когда впервые выбрал определенный набор звуков для того, чтобы с его помощью можно было исполнять простейшие мелодии. Можно предположить, что все это происходило чисто интуитивно – на слух: доисторический музыкант проделывал отверстия в камышовой дудочке с таким расчетом, чтобы извлекаемые из нее звуки были приятны на слух – ни о каких октавах, квинтах и терциях он, естественно, и не задумывался. Если звучало плохо, то дудочка выбрасывалась и делалась новая. И так – пока не получится то, что надо. Можно также предположить, что извлекаемые с помощью такой дудочки звуки были, тем не менее, консонансными – органы слуха у наших предков были устроены точно таким же образом, что и у нас. А острота слуха была даже и повыше. Поэтому среди набора звуков, извлекаемых с помощью первых музыкальных инструментов, наверняка были и октавы, и квintы, и кварты – поскольку они как раз и есть самые консонансные. Хотя сами древние музыканты о существовании таких понятий и не подозревали.

Простейшие шкалы, состоящие всего из одного-двух-трех интервалов, можно обнаружить у примитивных или древних культур и сейчас: в национальных мелодиях народов Крайнего Севера, индейцев Северной Америки, аборигенов Океании и Индонезийских островов.

В музыке развитых культур использовались более сложные музыкальные шкалы. Одной из наиболее известных среди них является **пентатоника** (от греческих слов «пенте» – пять и «тонос» – натяжение, тон), все звуки которой могут быть расположены по чистым квинтам и/или квартам [32]. Как правило, пентатонический звукоряд состоит из пяти тонов и не содержит полутонов, поэтому его еще называют «**ангемитонный**» (от греческой отрицательной приставки «ан» и слова «гемитонос» – полутон). Например, *C-D-E-G-A* (*До-Ре-Ми-Соль-Ля*). Однако существует еще и полутоновая пентатоника, распространенная, к примеру, в японской традиционной музыке, смешанная пентатоника и даже темперированная. Поэтому правильнее будет квалифицировать пентатонический звукоряд как состоящий из пяти ступеней, а не пяти тонов.

Пентатоника лежит в основе традиционной музыки у народов Китая, Вьетнама, Монголии, тюркских народов России (татар, башкиров, бурятов, чувашей и др.) [45]. Также встречается она и в музыкальном фольклоре Европы (в том числе – в Греции), а также в русском народном песенном творчестве (особенно в древнейших обрядовых песнях). Академические композиторы, начиная с XIX в., применяли пентатонику для придания музыке аромата архаики.

В европейской музыкальной культуре широкое распространение получила **диатоническая шкала** (от греческих слов *dia* – через и *phone* – звук), построенная на пяти целых тонах и двух полутонах (без диезов и бемолей). В традиционной (классической) теории музыки под диатоническим строем понимают восемь основных ступеней музыкального ряда, взятых в пределах какой-либо октавы. При этом восьмая нота играет двойную роль, она не только завершает одну октаву, но и начинает новую. Именно поэтому октава и называется октавой – от греческого слова *oct* – восемь. Диатоническим звукорядом мы пользуемся, когда играем только на белых клавишах пианино – не используя черные. Диатоническую октаву (гамму) можно построить, взяв в качестве первой ноты любую из нот диатонического ряда: *До (C) – Ре (D) – Ми (E) – Фа (F) – Соль (G) – Ля (A) – Си (B) – До (C)*. При этом получится семь разных гамм с различным звучанием. Эти гаммы были известны еще в Древней Греции. Греки даже придумали им наименования, отражающие их настрой: грустная *лидийская*, торжественная и праздничная *ионийская* (мажорная), воинственная и важная *дорийская*, печальная *эолийская* (минорная), вдохновенная *фригийская* и еще *локрийская*. Из всего этого многообразия сейчас в европейской музыке используются только два варианта – мажорный и минорный.

В XIX в. была разработана более сложная **хроматическая шкала**, состоящая из двенадцати полутонов в октаве. Разновидности этой шкалы в последние два столетия наиболее активно используются при создании музыки.

Наконец, в последние десятилетия европейские музыканты пытаются вернуться к созданию композиций, основанных на использовании **микротоновых шкал** с интервалами меньше полутона (четвертитоны, третитоны

и пр.), которые были известны еще в Древней Греции и широко использовались и используются до сих пор в восточных музыкальных культурах.

Рассмотрим чуть более подробно построение шкал, оказавших наибольшее влияние на развитие европейской музыки.

2.13.3. Пифагорейская шкала

Пифагор был философом и математиком – автором известной теоремы, которая вот уже более 25 веков носит его имя. Но музыкантом Пифагор не был, хотя последнее иногда оспаривается. Однако он был греком, а значит личностью от природы музыкальной и к тому же очень амбициозной. До всего ему было дело.

Заинтересовавшись проблемой музыкальной гармонии, Пифагор решил подойти к ней с точки зрения математики. Будучи основоположником и убежденным сторонником теории совершенства малых чисел, он предположил, что для получения наиболее совершенных консонантных интервалов между звуками музыкальной шкалы необходимо, чтобы отношения их частот (интервальные коэффициенты) представляли собой отношения малых чисел – в первую очередь квинты (3 : 2) и кварты (4 : 3). Доказательством правильности этого предположения служили уже известные к тому времени факты безусловной консонантности октавы 2 : 1 и трезвучия 4 : 5 : 6.

Для проведения своих опытов со звуком Пифагор воспользовался монохордом – продолговатым ящиком с натянутой поверх него струной (рис. 2.52). Рядом со струной, на верхней крышке ящика, он начертил шкалу, чтобы удобно было делить струну на части. В ходе своих экспериментов Пифагор пытался разобраться, как можно физически обеспечить получение звуков требуемой высоты. Прежде всего, он выяснил, что для повышения частоты тона на октаву, струну необходимо укоротить в два раза; для понижения – в два раза удлинить. Следовательно, чтобы повысить тон на квинту, надо взять $\frac{2}{3}$ струны, а если взять от нее еще $\frac{2}{3}$, то тон повысится еще на квинту и т. д. Опыты, проведенные с монохордом, позволили Пифагору математически описать поведение звучащей струны, вывести формулы построения звукоряда и, тем самым, заложить основы науки, известной сейчас как музыкальная акустика [46–48].



Рис. 2.52. Монохорд (схема)

Монохорд (от греческих слов *monos* – один и *chorde* – струна) – инструмент, предназначенный для наблюдения законов колебания струн и точного построения музыкальных интервалов путем фиксации различных длин звучащей части возбуждаемой щипком струны. Состоит из основания (резонаторного ящика), на котором между двумя порожками (подставками) закреплена натянутая струна. Между ними находится подвижная подставка, прижимающая струну снизу, перемещением которой можно фиксировать звучащую часть струны. На основание монохорда может наноситься шкала с делениями. Использовался в качестве важнейшего пособия в элементарном музыкальном образовании и основного прибора для проведения музыкально-акустических экспериментов в Средние века, в эпоху Возрождения, вплоть до барокко.

Разобравшись с закономерностями, связывающими теорию с практикой, Пифагор приступил к решению основной задачи: как настроить инструмент, чтобы, не увеличивая количество звуков в каждой октаве сверх двенадцати, дать возможность музыкантам свободнее переходить из тональности в тональность и из лада в лад. Взяв за основу интервал с отношением самых малых после октавы чисел – квинту (3:2), Пифагор разработал шкалу, которая считалась самой совершенной в европейской музыке вплоть до конца XVII в.

Идея построения шкалы заключается в следующем. Одна из нот – к примеру, нота *До* (C) – принимается за опорную. Затем выполняется переход на квинту вверх, т. е. частота ноты *До* умножается на интервальный коэффициент квинты $3/2$. Получается частота, соответствующая пятой ноте вправо от *До* – ноте *Соль* (G). Если результат еще раз умножить на интервальный коэффициент квинты $3/2$, то получится частота ноты *Ре* (D). Продолжая выполнять ту же операцию, можно последовательно получить ноту *Ля* (A), ноту *Ми* (E) и ноту *Си* (B). Ноту *Фа* (F) удобнее получить путем перехода от ноты *До* на квинту вниз, т. е. путем деления на интервальный коэффициент квинты $3/2$.

В результате получается семь нот диатонической шкалы со следующими интервальными коэффициентами относительно опорной ноты *До* (C): $2/3$, 1, $3/2$, $(3/2)^2$, $(3/2)^3$, $(3/2)^4$, $(3/2)^5$, которые после возведения в степень окажутся равными: $2/3$, 1, $3/2$, $9/4$, $27/8$, $81/16$, $243/32$ (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Семь нот,
полученных квинтовыми переходами от ноты *До*

$2/3$	1	$3/2$	$(3/2)^2$	$(3/2)^3$	$(3/2)^4$	$(3/2)^5$
$2/3$	1	$3/2$	$9/4$	$27/8$	$81/16$	$243/32$
<i>Фа</i>	<i>До</i>	<i>Соль</i>	<i>Ре</i>	<i>Ля</i>	<i>Ми</i>	<i>Си</i>

Из таблицы видно, что все ноты, кроме *До* и *Соль*, находятся за пределами одной октавы. Чтобы ввести их внутрь, надо вычесть одну, две или три октавы соответственно, т. е. необходимое число раз поделить их частоты на интервальный коэффициент октавы 2:1. Полученный результат с привычной последовательностью нот представлен в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Интервалы и интервальные коэффициенты
диатонической Пифагорейской шкалы

1/1	9/8	81/64	4/3	3/2	27/16	243/128	2/1
<i>До</i>	<i>Ре</i>	<i>Ми</i>	<i>Фа</i>	<i>Соль</i>	<i>Ля</i>	<i>Си</i>	<i>До</i>
	↑	↑	↑	↙	↙	↑	↑
9/8	9/8	256/243	9/8	9/8	9/8	256/243	
тон	тон	полутон	тон	тон	тон	полутон	

В полученной диатонической шкале целый тон имеет интервальный коэффициент 9/8, а полутон – 256/243.

Если продолжить квинтовые переходы, то можно получить ноты хроматической шкалы – с диезами (") и бемолями (') (табл. 2.10).

Таблица 2.10

Хроматическая шкала, полученная квинтовыми переходами

$(2/3)^6$	$(2/3)^5$	$(2/3)^4$	$(2/3)^3$	$(2/3)^2$	2/3	1	3/2	$(3/2)^2$	$(3/2)^3$	$(3/2)^4$	$(3/2)^5$	$(3/2)^6$
<i>Соль'</i>	<i>Ре'</i>	<i>Ля'</i>	<i>Ми'</i>	<i>Си'</i>	<i>Фа</i>	<i>До</i>	<i>Соль</i>	<i>Ре</i>	<i>Ля</i>	<i>Ми</i>	<i>Си</i>	<i>Фа"</i>

Если затем каждый тон перенести внутрь октавы, то окажется, что крайняя правая нота (в рассматриваемом случае это *Фа-диез*) и крайняя левая нота (*Соль-бемоль*) будут соответствовать разным частотам, хотя это одна и та же нота. Тот же самый эффект будет наблюдаться, если выбрать в качестве опорной любую другую ноту: пониженный звук никогда не будет равен повышенному предыдущему. Причина этого явления в том, что никаким количеством квинтовых переходов невозможно попасть в одну и ту же ноту, взятую на октаву выше (или ниже), поскольку любое целое число квинт не равно целому числу октав:

$$(3/2)^m \neq (2/1)^n.$$

Наименьшая разница получается, если 12 квинтовых переходов сравнивать с 7 октавами, при этом $(3/2)^{12} = 129,764$, а $(2/1)^7 = 128$. Две одинаковые ноты, полученные разными путями, отличаются друг от друга на величину $129,764/128 = 1,01364$. Эта разница составляет примерно 1/9 целого тона или 1/4 полутона. Она называется *Пифагоровой* или «*волчьей*» *коммой* (от греческого слова *сотта* – отрезок).

Возникшая неоднозначность в определении высоты одной из нот шкалы (отсутствие энгармонизма) более всего коснулась инструментов с фиксированной настройкой: органов, роялей и пр. Противоречие настройщики решали просто: усредняли две частоты одного из звуков и настраивали одну из клавиш инструмента на эту усредненную частоту – для слушателя с обычным слухом это практически незаметно. Причем «прятали» комму в такой клавише, которая не использовалась при игре в тех тональностях, в которых исполнялись планируемые в концерте произведения. Правда, если репертуар менялся, то инструменты приходилось перенастраивать. А вот скрипачам или тромбонистам комма практически не мешала: скрипач может по-разному сыграть *Соль-бемоль* и *Фа-диез*. Так же как и тромбонист – кулиса его инструмента способна передвигаться совершенно свободно.

Недостатком шкалы Пифагора также является незамкнутость строя и отсутствие энгармонизма, поэтому транспонирование мелодии здесь невозможно.

Энгармонизм (от греческого слова *enarmonios* – энгармонический, буквально – согласный, созвучный, стройный) – это равенство по высоте различных по написанию звуков. Например, *До-диез* и *Ре-бемоль* или *Ля-диез* и *Си-бемоль*.

Однако, несмотря на указанные недостатки, достоинством шкалы Пифагора является то, что в ней используются чистые квинты и кварты. Это значительно облегчает настройку инструментов.

2.13.4. *Натуральная шкала*

Натуральной (или *чистой*) называется шкала, построенная на основе гармоник основного тона: октаве (2 : 1), квинте (3 : 2), кварте (4 : 3), большой терции (5 : 4), малой терции (6 : 5), большом целом тоне (9 : 8), малом целом тоне (10 : 9) и диатоническом полутоне (16 : 15).

Поиски строя, который был бы пригоден не только для исполнения мелодий, но и обеспечивал бы консонантное звучание гармонических интервалов и аккордов, проводились еще во времена Древней Греции. Идея использования консонантно звучащей большой терции (5 : 4) вместо пифагоровой выдвигалась греческим философом Дидимом (I в. до н. э.), жившим и работавшим в Александрии. В XV в. это пытался сделать испанец Рамос де Пареха, который известен еще и тем, что первым ввел в практику принцип построения мажорных трезвучий с соотношением частот 4 : 5 : 6. Однако ни во времена Дидима, ни во времена Рамоса де Пареха идея эта у современников поддержки не нашла. И только в XVI в., когда большая терция стала широко использоваться в практике музыкального искусства, ситуация изменилась. Известный итальянский философ, математик, теоретик музыки и композитор XVI в. Лодовико Фольяни (автор трактата «Теория музыки» («Musica theoricа» – 1529 г.) и его последователь Джозеффо Царлино утвердили ее в качестве основного интервала и предложили шкалу,

использующую наиболее естественные, данные самой природой основания для строя – гармоника фундаментальной частоты [49, 50]. Эта шкала стала известна как натуральная или чистая.

Диатоническая шкала, построенная по этому принципу относительно ноты *До* (C), показана в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Интервалы и интервальные коэффициенты
диатонической натуральной шкалы

1/1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2/1
<i>До</i>	<i>Ре</i>	<i>Ми</i>	<i>Фа</i>	<i>Соль</i>	<i>Ля</i>	<i>Си</i>	<i>До</i>
	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15	

Используя диатонический полутон (16/15), можно получить двенадцатитоновую хроматическую шкалу (с диезами и бемолями).

Ноты натуральной шкалы абсолютно гармоничны начальному тону, но только в пределах данной тональности. Поэтому транспонирование мелодий по высоте здесь невозможно. Кроме того, имеются два целых тона: мажорный 9/8 и минорный 10/9. Из-за этих недостатков натуральная шкала широкого распространения так и не получила.

2.13.5. *Равномерно темперированная шкала*

В общем смысле *равномерно темперированной* (от слова *temperare* – упорядочивать, приводить в порядок) называется шкала, в которой определенный интервал (необязательно октава) делится на некоторое число математически равных ступеней. Однако чаще всего этим термином обозначают шкалу, в которой октава делится на двенадцать совершенно одинаковых полутонов. Такая шкала вот уже более 300 лет используется в качестве стандартной для музыкальных инструментов с фиксированной настройкой [3, 14, 18, 35, 40, 51, 52].

Непосредственный предшественник равномерно темперированного строя – натуральный, с самого начала не устраивал композиторов и музыкантов, поскольку не позволял транспонировать мелодию из тональности в тональность без возникновения существенных диссонансов. Поэтому многие ученые из разных стран (не только европейских) были озабочены созданием «идеальной» шкалы, обладающей замкнутостью и энгармонизмом.

Среди первых ученых, предлагавших практические способы деления октавы на 12 равных интервалов – немецкий математик и теоретик музыки Генрих Грамматеус (1518), итальянский теоретик музыки, композитор и лютист Винченцо Галилей – ученик Джозеффо Царлино и отец Галилео Галилея (1581), французский математик, физик, философ и теоретик музыки Марен Мерсенн, китайский принц Чжу Цзайюй (1584), фламандский мате-

матик Симон Стевин (1585) и др. Следует, однако, отметить, что были и противники равномерной темперации – из-за отсутствия в ней чистых интервалов (кроме октавы). Равномерно темперированный строй, по их мнению, нарушал строгую пропорцию интервалов, и как следствие, в аккордах начали появляться небольшие биения. В глазах многих теоретиков это было посягательством на чистоту музыки. К примеру, немецкий музыкальный теоретик, акустик, композитор и органист Андреас Веркмейстер (1645–1706) активно пропагандировал так называемый «хорошо темперированный» строй – целое семейство неравномерных темпераций, позволявших, тем не менее, вполне успешно играть в любой из тональностей. Принимая все преимущества равномерной темперации, Веркмейстер отмечал, что, не теряя возможности игры во всех тональностях, «наиболее употребительные терции» следует делать более чистыми – а это достижимо только при неравномерной темперации. Неравномерные темперации получили распространение в немецкой музыке эпохи барокко. Многие исследователи разделяют мнение, что «Хорошо темперированный клавир» Иоганна Себастьяна Баха, хорошо знакомого с работами Веркмейстера, написан для инструментов именно с такой неравномерной темперацией.

Тем не менее в конце XVII – начале XVIII вв. усилиями теоретиков и музыкантов (Баха, Скарлатти, Куперена и др.) равномерно темперированная шкала все-таки завоевала признание у композиторов и музыкантов и была принята ими на вооружение, став фактическим стандартом в европейской музыке.

Для того чтобы музыкальная шкала обеспечивала возможность транспонирования мелодии на любой интервал вверх или вниз с сохранением звуковысотных соотношений, необходимо, чтобы все интервальные коэффициенты в пределах этой шкалы были совершенно одинаковыми.

Такую шкалу можно получить, если воспользоваться шкалой Пифагора и попытаться избавиться от основного ее недостатка – коммы. Для этого нужно разделить комму на 12 равных частей и на полученную величину уменьшить все двенадцать квинт. Каждая квинта при этом сократится ровно на $1/108$ тона. Сумма 12 таких уменьшенных квинт будет в точности равна семи октавам, а энгармонически равные звуки (диезы и бемоли) при этом совпадут. Поскольку целый тон получается за счет двух квинтовых переходов, то, уменьшив каждый целый тон на $1/54$, в октаве удастся получить ровно шесть целых тонов. Полутоны хроматические и диатонические при этом совпадут, а в октаве будет содержаться ровно двенадцать совершенно одинаковых полутонов.

Таким образом, чтобы определить интервальный коэффициент полутона в равномерно темперированной шкале, нужно выполнить следующие действия:

– сложить двенадцать интервалов, равных полутону, т. е. перемножить их интервальные коэффициенты K и приравнять результат к интервальному коэффициенту октавы $2 : 1 : K \times K \times K \times \dots \times K = K^{12} = 2$;

– извлечь корень 12-й степени из 2: $K = \sqrt[12]{2} = 1,0595$.

Следовательно, интервальный коэффициент полутона в равномерно темперированной шкале всегда равен 1,0595.

Зная значение частоты какой-либо ноты шкалы (как правило, это стандартное значение частоты, соответствующее ноте *Ля* первой октавы – 440 Гц) и на сколько полутонов отличается от нее другая нота, можно легко рассчитать соответствующую этой ноте частоту. Например, нота *Ля-диез*, отличающаяся от ноты *Ля* на один полутон, имеет частоту $440 \times 1,0595 = 466,18$ Гц. Таким образом, чтобы рассчитать значение частоты для какой-либо ноты равномерно темперированной шкалы, надо, взяв за основу значение частоты ноты *Ля* первой октавы (или известное значение частоты любой другой ноты), умножать его на K столько раз, на сколько полутонов отличается данная нота от известной.

В равномерно темперированной шкале для более точной оценки величин интервалов используется понятие *цент*. Цент – это величина в 100 раз меньшая, чем полутон. Соответственно, интервальный коэффициент цента C можно рассчитать тем же способом, что и интервальный коэффициент полутона: $C \times C \times C \times \dots \times C = C^{100} = K = 1,0595$. То есть $C = \sqrt[100]{1,0595} = 1,000578$.

Следовательно, интервальный коэффициент цента в равномерно темперированной шкале равен 1,000578.

Октава в равномерно темперированной шкале состоит из 12 полутонов и, следовательно, из 1200 центов, квинта – из 7 полутонов или 700 центов, кварта из 5 полутонов или 500 центов и т. д. По вышеприведенной методике можно рассчитать интервальные коэффициенты для этих интервалов. При этом получится, что интервальный коэффициент квинты равен 1,498, кварты – 1,335 и т. д.

Интервальные коэффициенты и количество центов для основных музыкальных интервалов во всех трех рассмотренных выше музыкальных шкалах приведены в табл. 2.12.

Из сравнения равномерно темперированной и чистой шкал видно, что первая не обеспечивает ни одного (кроме октавы) чистого интервала – ни квинты ($3/2$), ни кварты ($4/3$), ни терции ($5/4$) и др. Отклонение квинты от точной настройки в равномерно темперированной шкале – 2 цента, кварты – 2 цента, мажорной терции – 4 цента и т. д. Отклонения хотя и небольшие, но все интервалы из-за этого становятся слегка диссонансными.

Тем не менее равномерно темперированная шкала представляет собой «строй замкнутый и энгармонический», позволяет транспонировать мелодию по высоте, состоит из интервалов, вполне приемлемых для слуха – как при мелодическом, так и при гармоническом исполнении, имеет в каждой октаве только двенадцать звуков и поэтому требует относительно простого устройства инструментов.

Таблица 2.12

Величины интервальных коэффициентов для основных музыкальных интервалов и их размеры в центах в различных шкалах

Интервал	Равномерно темперированная шкала		Чистая шкала		Шкала Пифагора	
	отношения частот	центы	отношения частот	центы	отношения частот	центы
Октава	2,000	1200	$2/1 = 2,000$	1200	2,000	1200
Квинта	1,498	700	$3/2 = 1,500$	702	1,500	702
Кварта	1,335	500	$4/3 = 1,333$	498	1,333	498
Б. терция	1,260	400	$5/4 = 1,250$	386	1,265	408
М. терция	1,189	300	$6/5 = 1,200$	316	1,184	294
Б. секста	1,682	900	$5/3 = 1,667$	884	1,687	906
М. секста	1,587	800	$8/5 = 1,600$	814	1,580	792

В табл. 2.13 приведены значения частот, соответствующих нотам равномерно темперированной шкалы.

Таблица 2.13

Шкала частот,
соответствующих двенадцати полутонам равномерно темперированной шкалы

	Субконтр-октава	Контр-октава	Большая октава	Малая октава	1-я октава	2-я октава	3-я октава	4-я октава	5-я октава
<i>До</i>	16,35	32,703	65,406	130,81	261,63	523,25	1046,5	2093,1	4186
<i>До-диез</i>	17,32	34,647	69,295	138,59	277,18	554,37	1108,7	2217,5	4435
<i>Ре</i>	18,35	36,708	73,416	146,83	293,66	587,33	1174,7	2349,3	4699
<i>Ре-диез</i>	19,45	38,891	77,782	155,56	311,13	622,25	1244,5	2489,0	4978
<i>Ми</i>	20,60	41,203	82,406	164,81	329,63	659,26	1318,5	2637,0	5274
<i>Фа</i>	21,83	43,653	87,307	174,61	349,23	698,46	1396,5	2793,8	5588
<i>Фа-диез</i>	23,12	46,250	92,500	185,00	370,00	740,00	1480,0	2960,0	5919
<i>Соль</i>	24,5	49,000	98,000	196,00	392,00	784,00	1568,0	3136,0	6272
<i>Соль-диез</i>	25,96	51,913	103,83	207,65	415,30	830,60	1661,2	3322,4	6645
<i>Ля</i>	27,50	55,000	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,0	3520,0	7040
<i>Ля-диез</i>	29,135	58,270	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,7	3729,3	7459
<i>Си</i>	30,867	61,734	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,5	3951,1	7902

Из-за отсутствия чистых интервалов (кроме октавы) равномерно темперированная шкала постоянно критикуется. Предпринимались попытки построить темперированный строй из 24 и 48 тонов в октаве. Математически было доказано, что самое близкое приближение к натуральным интервалам мог бы дать 53-тоновый звуковой темперированный строй, однако практически он пока так и не реализован, хотя попытки

построения таких шкал до сих пор продолжают. Современные компьютерные технологии позволяют реализовать шкалы даже с еще меньшими интервалами, но исполнение музыки на инструментах с таким большим количеством клавиш (или других органов управления) представляется задачей весьма затруднительной.

2.13.6. Стандартная высота тона

Для того чтобы можно было одинаково настраивать музыкальные инструменты, особенно используемые в составе одного и того же оркестра, необходимо выбрать какую-либо ноту и поставить ей в соответствие вполне определенное значение частоты звуковых колебаний. В качестве такой опорной ноты по давно сложившейся традиции принято использовать ноту *Ля* первой октавы (в общепринятой международной шкале – *A4*). А вот частота, соответствующая этой ноте, на протяжении даже не столь уж давней истории музыкальной культуры много раз менялась. Немецкий композитор, органист и музыкальный теоретик Михаэль Преториус (1571–1621) в 1619 г. предложил использовать в качестве эталонной высоты тона, соответствующего ноте *A4*, звук с частотой 422,5 Гц. Эта частота довольно широко использовалась в качестве эталонной вплоть до начала XIX в., хотя в то же самое время существовали и другие частоты настройки. Например, в Дрездене для настройки органов использовалась частота 415 Гц, в Парижской опере инструменты настраивались исходя из эталонной частоты 404 Гц и т. д.

Современным стандартом высоты тона является частота **440 Гц**, утвержденная на международной конференции в Лондоне в 1939 г. Однако такая частота уже не впервые предлагалась в качестве эталонной – первый раз аналогичное решение было принято еще в 1812 г. по инициативе Парижской консерватории. В XIX в. эта частота практически повсеместно использовалась при настройке музыкальных инструментов. Тем не менее в некоторых случаях, обусловленных, к примеру, сложившимися традициями (или иными причинами), применялись (и применяются до сих пор) и другие частоты настройки – 435 Гц, 444 Гц, 450 Гц (английский оперный театр Ковент-Гарден), 454 Гц (рояли «Стейнвей») и пр.

Для формирования тона со стандартной частотой звуковых колебаний в повседневной жизни применяются камертоны. Но в качестве эталонных источников колебаний используются специальные электронные приборы на кварцевых резонаторах, которые генерируют звуковые колебания с частотой 440 Гц с очень высокой точностью и долговременной стабильностью. Эталоны стандарта частоты хранятся в специальных учреждениях, где поддерживается постоянная температура, влажность и прочие условия. В России таким учреждением является государственный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, расположенный в Санкт-Петербурге.

2.14. Восприятие музыки и речи

С точки зрения физики речь, музыка и пение – это звуковые сигналы, имеющие вполне конкретные объективные и субъективные характеристики. Восприятие их происходит в соответствии с теми же законами физиологии, что и восприятие прочих звуковых сигналов: шума морского прибоя, автомобильной сирены, грохота станков в заводских цехах, шелеста листвы в саду и пр. Однако, кроме физических характеристик, эти виды сигналов обладают еще и *смысловой* и/или *эмоциональной* составляющими, поскольку к их появлению всегда причастен человек, желающий с их помощью что-то передать другим людям. Поэтому особенности их восприятия стоит рассмотреть отдельно.

2.14.1. Восприятие речи

С помощью речи человек передает информацию другим людям. По словам академика И. П. Павлова, речевое общение лежит в основе *второй сигнальной системы*, посредством которой человек воспринимает окружающую действительность. Однако очень часто речь содержит в себе не только смысловую составляющую, но еще и эмоциональную: одна и та же фраза, произнесенная с разными интонациями, может вызвать у того, к кому она обращена, совершенно разные чувства. Если мать, к примеру, скажет сыну: «иди спать» тихим ласковым голосом, с нежностью и любовью в голосе, то сын, скорее всего, пойдет в постель умиротворенный и сразу же уснет. А если она скажет то же самое раздраженным голосом или даже гневно прикрикнет на него, отрывая его при этом от какого-то любимого занятия, то сын, хоть и послушается, но вряд ли так уж сразу уснет, поскольку будет сильно обижен. Недаром говорят: «Речь лечит, но речь и калечит».

Исследования эффективности публичных выступлений, проведенные специалистами по нейролингвистическому программированию, показали, что из смыслового содержания речи говорящего слушатели получают только 7 % информации, 39 % – из его интонаций и тембра голоса, а 54 % – из жестов, принимаемых поз и мимики. Получается, что для слушателей важно не то, что говорит оратор, а как он это делает. Даже если отбросить воспринимаемую органами зрения часть выступления – в предположении, что выступление прослушивается по радио – все равно на эмоциональную часть речи приходится почти в 6 раз больше информации, чем на смысловую. Поэтому искусство убеждать в чем-то слушателей – ораторство с древнейших времен было важнейшим инструментом публичных людей и в первую очередь – политиков. При этом, как ясно из вышесказанного, совершенно неважно – правду ли говорит оратор, или просто манипулирует сознанием слушателей в своих (или чьих-то еще) интересах. В том числе, даже если интересы оратора прямо противоположны интересам слушателей, он может убедить их делать что-то им же во вред.

Ораторство – это раздел филологии, изучающий способы построения художественно выразительной, направленной и определенным образом воздействующей на слушателей речи [53–56].

Ораторство – одна из древнейших наук. В различные времена она занимала большее или меньшее место в развитии общества, ценилась выше или ниже, но никогда не исчезала. Объективной основой зарождения ораторского искусства стала насущная необходимость публичного обсуждения и решения вопросов, имевших общественную значимость. Ораторство как наука сложилась еще в Древней Греции в эпоху Афинской демократии. В этот период умение выступать публично считалось необходимым качеством каждого полноправного гражданина. По этой причине афинскую демократию можно назвать первой риторической республикой.

Отдельные элементы ораторства (например, фрагменты учения о фигурах, о формах аргументации) возникли еще раньше в Древней Индии и в Древнем Китае, но они не были сведены в единую систему и не играли столь важной роли в обществе.

Расцвет ораторства совпал с расцветом древней демократии, когда публично решались политические вопросы и вершился суд. Чтобы привлечь на свою сторону народ (демос), надо было представить свои идеи наиболее привлекательным образом. В этих условиях красноречие становится необходимым каждому человеку.

Принято считать, что ораторство как наука (или искусство) возникло примерно в 60-х гг. V в. до н. э. усилиями древнегреческих софистов Коракаса, Тисия, Протагора и Горгия. Коракас будто бы написал не дошедший до нас учебник «Искусство убеждения», а Тисий открыл одну из первых школ обучения красноречию. Протагору (около 481–411 до н. э.) принадлежат не дошедшие до нас сочинения «Искусство спора», «О науках» и др. Это он ввел в обиход формулу «Мера всех вещей – человек». Горгий (ок. 480–380 до н. э.), который был учеником Коракаса и Тисия, первым стал преподавать ораторское искусство в Афинах. Он сузил слишком размытый до него предмет ораторства: в отличие от других софистов, он честно признавался, что обучает вовсе не добродетели и мудрости, а исключительно ораторскому искусству. Берясь обучать всякого прекрасно говорить и будучи, кстати, виртуозом краткости, Горгий обучал всех желающих ораторству с тем, чтобы они умели покорять людей, «делать их своими рабами по доброй воле, а не по принуждению». Силою своего убеждения он даже мог заставить больных пить такие горькие лекарства и соглашаться на такие болезненные и рискованные операции, принудить к которым их не могли даже врачи [57–59].

Следует заметить, что в Древней Греции отношение к софистике и к софистам было весьма неоднозначным, что отразилось даже в понимании слова «софист». Вначале оно обозначало человека мудрого, талантливого, хорошо владеющего каким-либо искусством и оттого, безусловно,

уважаемого. Однако впоследствии мнение о софистах изменилось. Их беспринципность и способность с блеском отстаивать две прямо противоположные точки зрения одновременно привели к тому, что слово «софист» приобрело отрицательную окраску и стало восприниматься как болтун, шарлатан и хитрец.

Непревзойденным оратором был Аристотель, а также его ученик Александр Македонский, который пламенными речами мог заставить своих воинов смело бросаться в самые рискованные сражения с численно превосходящим противником и побеждать его.

Развитию красноречия в Древнем Риме во многом способствовали блестящие образцы греческого ораторского искусства, которое со II в. до н. э. становится здесь предметом тщательного изучения в специальных школах. Однако немало ценного и заслуживающего внимания внесли в науку и практику ораторского искусства сами римляне. Виднейшие ораторы и теоретики красноречия Древнего Рима смогли проникнуть в тайны слова, расширить границы его познания, выдвинуть теоретические и практические принципы ораторской речи как искусства, основываясь на собственном богатом опыте и на анализе многочисленных блестящих речей других известных ораторов. В их работах присутствует настолько интересный и глубокий анализ искусства убеждения, что много столетий спустя, уже в наши дни, специалисты по пропаганде находят там идеи, считавшиеся достижением только нового времени [60, 61].

Незаурядным ораторским искусством обладали братья Гракхи (II в. до н. э.). Благодаря своему красноречию, они, будучи трибунами, сумели провести целый ряд реформ в пользу простых граждан Рима, несмотря на яростное сопротивление сената. Особенно сильным оратором был младший из братьев – Гай Гракх. Кроме великолепного дара слова, он в своих выступлениях пользовался еще и некоторыми театральными приемами.

Хорошо известно ораторское искусство Гая Юлия Цезаря (102–44 г. до н. э.) и Марка Туллия Цицерона (106–43 г. до н. э.). Последний, имя которого стало нарицательным для выдающегося оратора, выработал свой собственный стиль выступлений и неизменно подчеркивал в своих сочинениях необходимость сочетания красноречия с убедительностью, ораторства с философией. Во главу угла Цицерон ставил содержательность и убедительность речи, а не ее внешнюю форму и красоту. Идеалом оратора для него был не ремесленник с хорошо подвешенным языком, а мудрец, знающий науку о красоте выражения.

Характеризуя структуру публичной речи, Цицерон обращает внимание на то, что «все силы и способности оратора служат выполнению следующих пяти задач: во-первых, он должен приискать содержание для своей речи; во-вторых, расположить найденное по порядку, взвесив и оценив каждый довод; в-третьих, облечь и украсить все это словами; в-четвертых, укрепить речь в памяти; в-пятых, произнести ее с достоинством и приятностью».

Но прежде чем приступить к делу, предупреждает Цицерон, надо в начале речи расположить слушателей в свою пользу, затем установить предмет спора и только после этого начать доказывать то, на чем оратор настаивает и что он опровергает. В конце речи следует подвести итоги сказанному, а именно «развернуть и возвеличить то, что говорит за нас, и поколебать и лишить значения то, что говорит за противников».

В трактате «Оратор» Цицерон излагает свое мнение о способах применения различных стилей в зависимости от содержания речи, с целью убедить слушателей, произвести впечатление изяществом и красотой речи, и, наконец, увлечь и взволновать возвышенностью. Большое внимание уделяется периодизации речи и расстановке акцентов, подробно излагается теория ритма, особенно в конце фразы, заключающей какую-либо мысль.

Некоторые исследователи считают, что наиболее ценным вкладом Цицерона в риторику является, во-первых, разработка понятия о долге оратора, во-вторых, выделение особого значения стиля и оформления речи. Проще говоря, оратор должен говорить правильно и красиво, не употребляя ни вульгарных, ни слишком научных выражений, и с уважением относиться к слушателям.

В Средние века ораторское искусство утратило свое былое значение. Начиная с поздней античности и вплоть до начала Нового времени самой влиятельной публичной фигурой стал религиозный проповедник – фигура, сопоставимая по влиятельности с королем и высшими сановниками. Проповедь обязаны были слушать все – даже если она была монотонна и косноязычна. Хотя и среди проповедников тоже были выдающиеся ораторы. Одним из них был византийский богослов Иоанн Златоуст. Само его прозвище свидетельствует об уважительном отношении к публичному слову и о почитании людей, умевших посредством живой речи воздействовать на слушателей. Другой выдающийся оратор Средневековья – Фома Аквинский (1225–1274), чьи труды легли в основу *гомилетики* – теории церковного красноречия. В ней на первый план выступают форма, внешняя красота и напыщенность, главным принципом становится не убеждение, а внушение. Важнейшее приобретение риторики в Средние века – это умение завладеть чувствами и сознанием людей, влиять на их психику и воображение. Эффективность и действенность ораторской речи в этот период характеризовалась именно такими умениями проповедника.

Из ораторов Нового времени нельзя не отметить ораторское искусство Адольфа Гитлера. «Как оратор – это удивительное триединство жеста, мимики и слова. Прирожденный разжигатель. С ним можно завоевать мир», – так отозвался в своем дневнике будущий министр пропаганды Третьего Рейха – Йозеф Геббельс о будущем лидере фашистской партии. Не в этой ли колдовской силе гитлеровского слова разгадка былой популярности его чудовищных идей?

Таким образом, великие ораторы прошлого хорошо понимали, что восприятие речи складывается из восприятия двух ее составляющих: смысловой (или семантической) и эмоциональной. Исследования физиологов последнего столетия показали, что и механизмы их восприятия также различны. Восприятие смысла информации основано на ее логическом анализе, который выполняется соответствующими центрами в левом полушарии мозга. При этом, чем выше уровень интеллекта слушателя, тем легче ему разобраться в том, что говорит оратор. Эмоциональная же составляющая, связанная с восприятием образов, обрабатывается в правом полушарии (подразд. 2.2.2). Это уже врожденный механизм, им обладает даже младенец.

Если в речи оратора содержится высокий уровень эмоциональной составляющей, то это вольно или невольно привлекает внимание слушателей и способствует запоминанию семантической информации.

Если оратор говорит монотонно и бесстрастно, то информация не только не усваивается и не запоминается слушателями, но и утомляет их. Слушатель в скором времени просто «отключается» и перестает что-либо воспринимать. Некоторые даже засыпают – если слушают сидя или лежа.

Из вышесказанного можно заключить, что если информация передается слушателю с ярко выраженной эмоциональной окраской, то даже если она лжива, слушателя можно увлечь и убедить в чем угодно. Разобраться в смысловой составляющей в таких условиях сможет только очень небольшое число людей, обладающих достаточно высоким интеллектом. Этим пользовались и пользуются сегодня политики, выступая на публичных мероприятиях. Людей, умеющих размышлять и делать правильные выводы – очень и очень немного. Большинство – люди верующие. Необязательно в смысле религии, а в том смысле, что не умеющие самостоятельно мыслить и делать выводы. Поэтому в тех странах, где правящая элита строит политику исключительно в своих собственных интересах, игнорируя интересы граждан, всеми средствами культивируются различного рода религии, поддерживаются и организуются мероприятия с высоким уровнем эмоционального содержания и негативным смысловым – с одной стороны, а с другой стороны – всеми способами затрудняется доступ граждан к образованию, науке и искусству, поскольку это развивает у граждан интеллект и способность делать правильные выводы. Как это было в Европе в эпоху Средневековья.

Сегодня искусство ораторства при правильном его использовании является эффективным инструментом в борьбе с языковой агрессией, демагогией, манипулированием. Знание основ ораторской науки поможет распознать демагогические и манипулятивные пропагандистские приемы в средствах массовой информации и в приватной коммуникации, а следовательно, эффективно защищаться от них.

Установлено, что передачу эмоциональной составляющей обеспечивает использование следующих механизмов:

- изменение высоты голоса во времени;
- изменение тембра голоса;
- изменение громкости голоса во времени;
- изменение темпа и ритма изложения.

Исследования основных акустических параметров речи при различном эмоциональном состоянии человека показали, что все они достаточно сильно меняются при изменении этого состояния. Радость, печаль, спокойствие, гнев, страх – все эти состояния отражаются на характере речи человека.

Если взять в качестве эталона речь в спокойном состоянии, то во время гнева или радости частота основного тона голоса человека довольно сильно повышается. Если человек находится в состоянии печали, то голос его, наоборот, понижается. Отличается также и динамика изменения высоты голоса. Спокойная речь характеризуется плавным изменением высоты тона во время произношения фразы, в состоянии страха эти изменения становятся, наоборот, очень быстрыми. Диапазон изменения частоты основного тона в спокойном состоянии и в печали небольшой, в страхе и в гнев гораздо больше [62].

Темп и ритм речи также меняются при смене эмоций. В состоянии горя и печали длина произносимых человеком фраз увеличивается, а в состоянии гнева или страха уменьшается. Изменяется также длина произносимых звуков. И не только гласных, но и согласных. Установлено, что при спокойной речи количество произносимых в секунду звуков примерно равно 4,3. В состоянии ярости – 4,2. Для страха характерна скорость примерно 3,8 звуков в секунду, для печали – примерно 1,7–1,9.

Таким образом, для того чтобы достоверно передать те или иные эмоции, человеку (актеру, диктору или ведущему передачи) нужно пользоваться различными приемами для изменения акустических характеристик своего голоса: менять его тембр (т. е. спектр), высоту, интенсивность, а также изменять темп и ритм речи. Особенно это важно в телевизионных передачах, поскольку несоответствие между характером излагаемой информации, выражением лица говорящего и его голосом будут восприниматься зрителями как фальшь. Хотя и в радиовещании доходчивость информации сильно зависит от того, как ее излагает тот, кто находится перед микрофоном. Слушатель ощущает даже его эмоциональное состояние. Поэтому, чтобы речевые программы звукового вещания обеспечивали ожидаемое воздействие на слушателя, необходимо обеспечивать высокий уровень передачи как семантической, так и эстетической составляющих информации.

Высоким уровнем профессионализма обладали дикторы центрального телевидения Гостелерадио СССР: Игорь Кириллов, Ангелина Вовк, Виктор Татарский, Светлана Моргунова, Валентина Леонтьева и др. Это люди с высокой культурой речи и профессиональным отношением к своей работе. Нормой для них считалось прийти в студию пораньше и подготовиться к передаче – настроиться на требуемое самоощущение и нужную интонацию.

Некоторые заранее просматривали тексты с речью, размечали интонации, ударения и даже отмечали фразы, после которых удобно сделать вдох.

После ликвидации дикторского отдела в апреле 1995 г. профессионализм в работе дикторов и ведущих передач перестал быть учитываемым фактором. Этой работой стали заниматься люди случайные, не имеющие никакой специальной подготовки. Отбор их стал производиться совсем по другим критериям, далеким от уровня профессионализма. В новостных передачах текст теперь механически и невыразительно проборматовывается. Ощущения слушателей от такой передачи никого не интересует. Главное – передать как можно больше информации в единицу времени. Во многих передачах нормой становится развязная, «раскованная» речь, никаким нормам нормального языкового общения не соответствующая. Поэтому слушать радио и смотреть телевизионные передачи многие почти перестали.

Не лучшую услугу радиовещанию оказал и технический прогресс. Стремление передать как можно больше информации в ограниченном диапазоне частот привело к тому, что информационные сигналы, которые передаются в цифровом виде, стали подвергаться компрессии, уменьшая их объем. Разборчивость речи при этом ухудшилась. Кроме того, для улучшения помехоустойчивости в аналоговом вещании стали активно использовать сжатие динамического диапазона сигнала – причем с очень высокой степенью. Помехоустойчивость возросла, но уменьшились возможности для передачи эмоциональной составляющей информации, роль которой, как рассматривалось выше, в общей структуре речи весьма и весьма значима.

Таким образом, при формировании технической базы радиовещания и подборе персонала следует учитывать все вышеперечисленные обстоятельства. Если, конечно, ставится задача обеспечить высокий уровень радио- и телепередач.

2.14.2. Восприятие певческих голосов

Пение – это особый вид искусства, создаваемый с помощью человеческого голоса.

Можно почти наверняка утверждать, что петь человек научился раньше, чем говорить. Почти все высшие животные способны издавать разнообразные звуки, которые с той или иной степенью приближения можно квалифицировать как пение. И характер этих звуков может меняться в зависимости от того, какую информацию животное хочет передать. Звуки, издаваемые нашими ближайшими родственниками – обезьянами, весьма разнообразны, и поэтому обезьяны с их помощью способны не только передавать информацию своим сородичам, но и выражать определенные обезьяньи чувства. А голоса многих птиц так и называются – пение.

В октябре 2013 г. появилось сообщение о том, что ученые-зоологи из Орнитологического института Общества Макса Планка (Германия)

на примере толстоклювого крапивника *Cyphorhynchus arada* (рис. 2.52) попытались доказать, что человеческая музыка может иметь гораздо больше общего с птичьими песнями, чем это может показаться на первый взгляд.



Рис. 2.52. Толстоклювый крапивник (*Cyphorhynchus arada*)

Cyphorhynchus arada, живущие в Южной Америке, давно известны музыкальными талантами: в своих песнях эти птички предпочитают использовать так называемые совершенные консонансы, т. е. октавы, чистые кварты и чистые квинты. В статье, которую Эмили Дулитл и Хенрик Брум опубликовали в *Journal of Interdisciplinary Music Studies*, сообщается, что песни крапивников *Cyphorhynchus arada* можно обнаружить в бразильской музыке. (К слову, знаменитый композитор Эйтор Вилла-Лобос в 1917 г. написал симфоническую поэму под названием «Уйрапуру» – так зовут *Cyphorhynchus arada* по-португальски.)

Кроме того, авторы работы уверяют, что пассажи из песен крапивника им удалось найти в сочинениях таких композиторов, как Гайдн и Бах. Некоторые фрагменты в песнях крапивников наводят на мысль, что птицы выстраивают их вокруг тонального центра. Впрочем, полагать пернатых знакомыми с музыкальной грамотой было бы слишком: просто они, как было сказано, предпочитают одни интервалы другим, что и вызывает иллюзию продуманной тональности.

То, что человек может выделить песни «музыкального крапивника» среди прочих, исследователи демонстрируют в эксперименте, в котором участвовал 91 человек. Каждому давали послушать песню крапивника или же сгенерированную на компьютере песню, которая по рисунку и продолжительности неотличима от рулад птички, но в которой интервалы слегка изме-

нены. Испытуемому нужно было оценить «музыкальность» пьес, и самыми музыкальными признавались как раз аутентичные птичьи «сочинения».

Не стоит, впрочем, делать из этих результатов слишком далеко идущие выводы. Авторы работы всего лишь констатируют удивительное сходство между особенностями тональной европейской музыки и птичьими песнями. Не будем забывать и о том, что птиц на свете много, равно как и способов сочинять музыку. И, например, Оливье Мессиан прислушивался вообще к любым птицам, не слишком беспокоясь, придерживаются ли они заветов Гайдна и Баха.

Что до крапивника, то было бы интересно поставить обратный опыт и посмотреть, как эта музыкальная птица будет реагировать на отрывки произведений, которые, как уверяют исследователи, так похожи на ее песни.

Предполагается, что пение как феномен возникло в период неолита как способ выражения человеком своего эмоционального состояния с помощью звуков голоса. С появлением членораздельной речи и простейших музыкальных инструментов – ударных (барабаны), духовых (дудочки, флейты), струнных (жилки животных, закрепленные на какой-нибудь прочной основе), пение постепенно превратилось в высокое искусство. Люди поняли, что слова, выраженные с помощью пения, обладают гораздо бóльшим эмоциональным воздействием, чем сказанные обычным голосом. Особенно в сопровождении какого-нибудь музыкального инструмента. Также стало понятно, что далеко не каждый голос обладает привлекательностью – у некоторых людей голоса обладают особенно приятным для слуха звучанием (тембром), у других – какого-то особого впечатления не производят, а у третьих голоса и вовсе неприятны и, соответственно, для пения не годятся. Выяснилось, что в определенной степени голос можно улучшить – сделать его более выразительным. Для этого человеку нужно выполнять определенные упражнения для голоса. Возникли школы пения. Люди, владеющие искусством пения, стали обучать других людей технике пения и постановкой их голосов.

Русская вокальная школа оформилась под влиянием художественных требований искусства русских композиторов-классиков М. И. Глинки, А. С. Даргомыжского, М. П. Мусоргского, А. П. Бородина, Н. А. Римского-Корсакова, П. И. Чайковского [63, 64].

Согласно современным представлениям, голоса профессиональных вокалистов должны обладать динамическим диапазоном не менее 35 дБ и охватывать диапазон частот не менее двух октав. Желательно также иметь запас по частоте примерно на терцию вверх и на терцию вниз. Кроме того, успех вокалиста в немалой степени зависит тембра его голоса.

По диапазону частот, перекрываемому голосом вокалиста, выделяют три основные группы мужских голосов и четыре группы женских (табл. 2.14).

Таблица 2.14

Виды певческих голосов

Вид голоса	Диапазон, от ноты до ноты	Частотный диапазон, Гц
Мужские голоса		
Бас	<i>Фа</i> большой окт. – <i>Фа</i> 1-й окт.	80–350
Баритон	<i>Ля</i> большой окт. – <i>Ля</i> 1-й окт.	100–400
Тенор	<i>До</i> малой окт. – <i>До</i> 2-й окт.	130–500
Женские голоса		
Контральто	<i>Фа</i> малой окт. – <i>Фа</i> 2-й окт.	170–780
Меццо-сопрано	<i>Ля</i> малой окт. – <i>Ля</i> 2-й окт.	200–900
Сопрано	<i>До</i> 1-й окт. – <i>До</i> 3-й окт.	250–1000
Колоратурное сопрано	<i>До</i> 1-й окт. – <i>Соль</i> 3-й окт.	250–1400

Существует еще одна разновидность мужского голоса – **бас-профундо** или просто **профундо** (от итальянского слова *profondo* – глубокий). Это очень низкий грудной голос. Обладатели профундо поют на октаву ниже басов, спускаясь иногда до *фа* контр-октавы (43,7 Гц). Бас-профундо в обычном пении используется редко, зато часто используется в церковно-хоровой музыке. Певцов с данным типом голоса также называют **октавистами**. Кстати, большинство таких певцов – из России. И в прошлом так было и так есть сейчас.

Примечание: выделенное в отдельный вид голоса колоратурное сопрано относится больше к характеристике голоса, а не к его частотному диапазону, поскольку **колоратура** (от латинского слова *coloro* – окрашиваю) – это способность голоса к движению, т. е. к исполнению быстрых виртуозных пассажей, украшающих вокальную партию.

Среди наиболее известных обладателей различных певческих голосов можно отметить следующих исполнителей.

Профундо: Иван Паторжинский, Степан Трезвинский, Лучано Нерони, Владимир Миллер (в настоящее время – солист Государственной академической Капеллы Санкт-Петербурга).

Басы: Федор Шаляпин, Борис Штоколов, Поль Робсон, Федор Стравинский, Иван Ребров.

Баритоны: Павел Лисициан, Георг Отс, Леонид Сметанников, Юрий Гуляев, Муслим Магомаев, Иосиф Кобзон, Дмитрий Хворостовский.

Теноры: Энрико Карузо, Леонид Собинов, Иван Козловский, Сергей Лемешев, Марио Ланца, Владимир Атлантов, Лучано Паваротти, Пласидо Доминго, Хосе Каррерас, Зураб Соткилава.

Контральто: Ирина Соколова, Анна Бичурина, Кэтлин Ферриер, Натали Штуцман, Корнелия ван Зантен.

Меццо-сопрано: Надежда Обухова, Полина Виардо, Елена Образцова, Тамара Синявская, Зара Долуханова.

Сопрано: Мария Калласс, Монсеррат Кабалье, Евгения Мирошниченко, Бэла Руденко, Галина Вишневская, Анна Нетребко.

Нельзя не отметить в связи с вышесказанным обладателя феноменальных вокальных данных Павла Федоровича Бабакова (1946–1994), выступавшего в жанре классической музыки и русского романса. Диапазон его голоса составлял шесть октав! Прежде всего, он был обладателем редчайшего баса-профундо. Но, кроме того, мог исполнить сцену из оперы за бас, баритон, тенор и даже сопрано! Такого уникального голоса не было, пожалуй, больше ни у кого в мире. Как писали о нем впоследствии музыканты группы «Поющие сердца»: «Каждая музыкальная фраза, спетая Павлом Бабаковым, нагрета волнами подлинной и глубокой чувственности».

Известно, что произношение звуков речи связано с образованием в голосовом тракте резонансных полостей. Спектральные максимумы энергии звуковых колебаний, соответствующие этим резонансным частотам, называются формантами. В общем случае каждому простейшему звуку речи (**фонеме**) соответствует своя форма голосового тракта, обусловленная изменением формы глотки и положения **артикуляционных органов** – языка, губ, зубов и пр.

Термин **форманта** (от латинского слова *formantis* – образующий) обозначает определенную частотную область, в которой вследствие резонанса усиливается некоторое число гармоник тона, производимого голосовыми связками, т. е. в спектре звукового сигнала форманта является достаточно отчетливо выделяющейся полосой усиленных частот, определяемой по усредненному значению частоты в этой полосе. Фактически феномен форманты есть проявление работы активного полосового фильтра в составе речевого тракта [65]. Форманты принято обозначать буквой F. Считается, что для характеристики звуков речи достаточно выделения четырех-пяти формант – FI, FII, FIII, FIV, FV, которые нумеруются в порядке возрастания их положения на оси частот: самая низкая – FI, следующая за ней – FII, и т. д. Примерные частотные характеристики первых трех формант для гласных звуков русской речи приведены в табл. 2.15.

Профессиональное пение, в первую очередь оперное, предполагает, что голос вокалиста должен быть отчетливо слышен на фоне звучания оркестра. Симфонический оркестр, в сопровождении которого приходится исполнять свои партии оперному певцу, создает звуковое давление до 100–110 дБ. При этом усредненный по времени спектр звучания оркестра совпадает со спектром

обычной человеческой речи: максимум звуковой энергии приходится на область частот 400–500 Гц, а затем с повышением частоты ее уровень постепенно уменьшается. В области наилучшей слышимости 2,5–3 кГц он уже примерно на 20 дБ ниже максимума. Конечно, вокалист всегда старается петь громко, однако создать настолько высокий уровень звукового давления, чтобы «перекричать» оркестр, обычный человеческий голос не в состоянии.

Таблица 2.15

Характеристики основных формант для гласных русского языка

Форманта	Диапазон занимаемых частот, Гц		Ширина формантной полосы (по уровню 0,7), Гц
	Мужской голос	Женский голос	
F1	200–800	250–1000	40–70
F2	600–2800	700–3300	50–90
F3	1300–3400	1500–4000	60–180

К счастью, во время пения спектральные характеристики голоса способны перестраиваться и при этом в голосе вокалиста возникают характерные **певческие форманты** (рис. 2.53). Первая речевая форманта слегка смещается в сторону высоких частот, а вторая, наоборот, вниз. Третья, четвертая и пятая форманты сближаются [18, 63, 66–69].

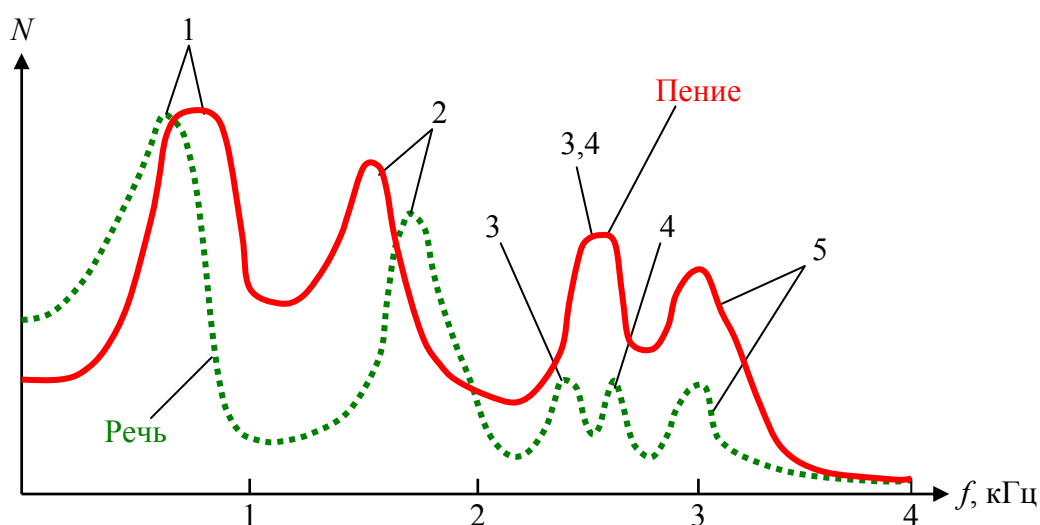


Рис. 2.53. Положение формант при речи и пении

Профессиональные певцы, в особенности оперные, путем длительного и систематического выполнения специальных упражнений вырабатывают способность к перестройке спектральных характеристик своего голоса таким образом, чтобы естественные изменения голосового тракта во время пения были выражены в максимально возможной степени. При этом в хорошо поставленном голосе формируются три певческие форманты: высокая – в полосе частот от 2100 до 3500 Гц (для разных типов голосов), средняя – в диапазоне 600–800 Гц и низкая – вблизи 500 Гц (рис. 2.54).

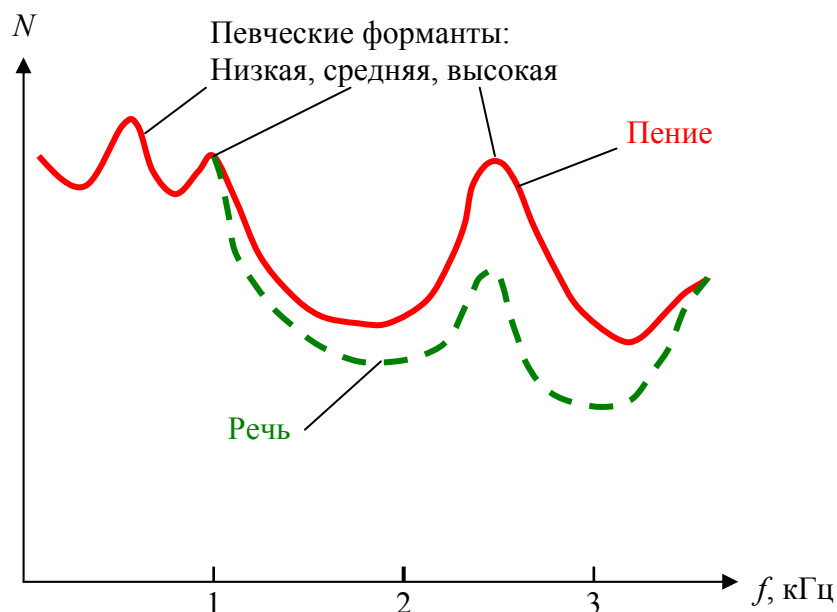


Рис. 2.54. Огибающие спектра для речи и пения

Особенно значима роль **высокой певческой форманты**. Поскольку эта форманта располагается в диапазоне максимальной чувствительности слуха, то именно ее наличие и обеспечивает отчетливую слышимость голоса певца на фоне звучания оркестра. При этом у вокалистов с хорошо поставленным голосом на эту форманту приходится до 30 % всей энергии звуковых колебаний. Кроме того, высокая певческая форманта придает голосу яркость, блеск, звонкость. Если с помощью фильтра удалить эту форманту, то голос певца будет звучать тускло и невыразительно [63]. Если, наоборот, выделить как самостоятельный звук, то звучание ее будет похоже на звон колокольчика или на трель соловья. Учеными, исследовавшими вопросы акустики певческих голосов, была даже предложена количественная мера оценки звонкости певческих голосов – коэффициент звонкости K , который равняется отношению энергии голоса в области высокой певческой форманты к его общей энергии:

$$K = I_{\text{ВПФ}} / I.$$

Измерения показали, что у оперных певцов с хорошо поставленными голосами коэффициент звонкости достигает 33–35 %, а у неквалифицированных певцов – всего лишь 5–10 %.

Положение высокой певческой форманты зависит от типа голоса. У басов и баритонов центральная частота ее располагается в диапазоне 2100–2500 Гц, у теноров – в диапазоне 2500–2800 Гц, у сопрано – в диапазоне 3000–3500 Гц. При этом положение ее для одного и того же голоса стабильно и не зависит ни от высоты исполняемой ноты, ни от того, какую гласную в данный момент произносит вокалист.

Средняя певческая форманта обеспечивает разборчивость вокальной речи, а наличие **низкой певческой форманты** придает голосу округлость, полноту, глубину и мягкость тембра.

Следует, однако, отметить, в некоторых видах пения высокая певческая форманта не нужна. Например, при исполнении бардовских или некоторых фольклорных песен в сопровождении акустической гитары. Здесь у исполнителя должен быть как раз негромкий задушевный голос – под стать такому же негромкому мягкому звучанию гитары. Подобный голос иногда так и называют – **гитарный**. Высокая певческая форманта в этом случае, как правило, ни к чему. А вот присутствие низкой и средней форманты будет весьма кстати.

Не используется высокая певческая форманта и в хоровом пении – здесь художественный эффект достигается совсем другими средствами.

Еще одним атрибутом хорошо поставленного голоса является наличие в арсенале исполнителя такого средства повышения художественной выразительности пения, как **модуляции**. Модуляция может быть как частотной, так и амплитудной. Оперные певцы чаще всего используют частотную модуляцию. Амплитудная модуляция (тремоло) используется реже – в фольклорном пении и иногда в поп-музыке.

Использование модуляции оживляет тембр голоса певца и улучшает эстетическое восприятие пения. Психоакустика объясняет этот феномен тем, что при монотонном исполнении нейроны, реагирующие на изменение параметров звуковых сигналов, выключаются, и внимание слушателя рассеивается. Модуляция же способствует поддержанию у слушателя интереса к исполнению, постоянно привлекая его внимание.

Частота модуляции, ее глубина и стабильность также имеют очень существенное значение для восприятия пения. Оптимальным значением частоты модуляции считается частота 5–7 Гц при глубине ее ± 50 центов. Именно такими параметрами характеризуются голоса выдающихся мастеров пения. Кроме того, частота модуляции у профессиональных певцов, в отличие от любителей, очень стабильна во время исполнения каждой конкретной музыкальной фразы, хотя может слегка изменяться в зависимости от высоты основного тона, типа исполняемой в данный момент гласной, длительности ее звучания и громкости [63, 67, 68].

Следует отметить, что при частоте модуляции ниже 5 Гц голос певца воспринимается как дребезжащий, старческий, а при частоте модуляции выше 7 Гц – как излишне нервный.

Использование модуляции, однако, нежелательно в хоровом пении, поскольку нарушает слаженность ансамбля, привлекая внимание к отдельным исполнителям.

Все вышесказанное относится, в основном, к голосам профессиональных певцов. Популярные исполнители, которые поют исключительно через микрофон, как правило, постановкой голоса себя не утруждают – их голо-

сами занимаются звукоинженеры. Современные технологии обработки и усиления звука позволяют обеспечить вполне приемлемым звучанием даже самый слабый и невыразительный голос. Для этого можно и откорректировать частотную характеристику, усилив нужные и ослабив ненужные обертоны, и добавить модуляцию, и изменить высоту тона – если певец откровенно фальшивит, и использовать всевозможные цифровые эффекты, усиливающие яркость звучания – эксайтеры, виталайзеры, гармонайзеры и пр. Главное для сегодняшнего поп-певца – это эффектная внешность, умение свободно держаться на сцене и вовремя открывать рот под фонограмму.

2.14.3. *Восприятие музыки*

С точки зрения физики **музыка** – это упорядоченная во времени и пространстве последовательность тональных звуков, обладающих определенными физическими параметрами и соответствующими им слуховыми характеристиками.

Однако такое определение никак не объясняет ни причин эмоционального воздействия музыки на человека, ни механизма ее влияния на психофизиологические процессы, протекающие в организме человека в момент восприятия. Исследованиями этих вопросов занимались многие ученые.

Физиолог Ч. Дизренс, обобщая в своей книге «Влияние музыки на поведение» результаты ряда психофизиологических исследований, проведенных другими авторами, заключает: «Разумеется, верен тот факт, что музыка оказывает глубокое влияние на физиологические реакции, и среди исследователей, занимающихся этой проблемой, достигнуто соглашение по следующим пунктам. Музыка усиливает метаболизм в теле, усиливает или уменьшает мускульную энергию, ускоряет дыхание и уменьшает его правильность, оказывает заметное, но изменяющееся влияние на объем крови, пульсацию и кровяное давление, таким образом, дает физическую основу для генезиса эмоций» [78].

Другой физиолог – Н. Черкас утверждает, что «не только музыка как таковая, но даже простые отдельные музыкальные тоны производят в организме резко выраженные физиологические изменения» [78]. Автор приводит экспериментально полученные данные, согласно которым в зависимости от интенсивности звука и его окраски меняется давление крови в сосудах.

Некоторые ученые придают решающее значение в формировании восприятия и реакции организма на восприятие музыки *гипоталамусу* – отделу промежуточного мозга, который контролирует деятельность эндокринной системы человека. По их мнению, гипоталамус преобразует нервные импульсы, поступающие к нему от периферической части слуховой системы в эмоциональные переживания, которые в свою очередь передаются в кору больших полушарий. Таким образом, гипоталамус создает эмоциональную компоненту восприятия музыки. Поскольку гипоталамус выполняет

в организме роль регулятора биологических ритмов, то музыкальные ритмы естественным образом воздействуют на организм слушателя. И, что интересно – именно в гипоталамусе находится так называемый «центр удовольствия», что было доказано многочисленными проведенными экспериментами [70].

По мнению многих авторов, гипоталамус реагирует на музыкальные импульсы так же, как и на все другие, к нему поступающие. Но положительно реагирует на музыку только тогда, когда она соответствует следующим параметрам.

1. *В музыке должны присутствовать различные периодически повторяющиеся звуковые элементы.* Частоты следования этих элементов должны также быть различны, т. е. должны присутствовать и элементы с низкой частотой следования и элементы с высокой частотой следования. Это свойство делает музыкальные ритмы подобными биологическим.

2. *Частоты следования повторяющихся звуковых структур должны быть синхронны.* Человеческие биоритмы строго синхронизированы. Например, один дыхательный цикл (вдох выдох) обычно соответствует четырем ударам сердца. Минутный цикл распределения крови соответствует шестнадцати дыхательным циклам, четырем циклам изменения кровяного давления и шестидесяти четырем ударам сердца. Кратность числу два и строгая синхронность в этих соотношениях очевидны. Также как и биоритмы, музыкальные ритмы должны быть синхронны. Наличие такой синхронизация будет благоприятно для человеческого организма. Когда все биоритмы строго синхронны, человек чувствует себя прекрасно и испытывает состояние, близкое к блаженству.

3. *Одновременно с синхронными ритмами, в музыке должен также присутствовать и изменяющийся элемент.* В течение дня люди выполняют многочисленные непериодические движения, которые проходят на фоне синхронности и периодичности биоритмов организма. Это нормальное состояние для человека. По аналогии с ним, на фоне периодичных музыкальных элементов должны существовать также звуки постоянно изменяющиеся, не имеющие периода своего повторения. Исследования спонтанных ритмов, образующихся в организме в процессе его повседневной деятельности, показало, что они «связаны с другими, находящимися внутри организма спонтанными ритмами» и зависят от основных ритмов человека.

Обязательным условием для совместного функционирования этих трех принципов является определенное состояние памяти гипоталамуса. Гипоталамус обладает небольшим объемом собственной локальной памяти, где он размещает необходимую ему информацию. Содержание этой памяти во многом определяет реакцию человека на музыку. От информации, там содержащейся, зависит то, получит ли человек удовольствие от звучания музыки или нет.

«Воспринимая музыку как особый вид биоритмов, гипоталамус хранит в своей памяти наиболее правильные комбинации музыкальных циклов. Информация о том, что именно считать правильным, формируется в течение всей жизни человека, но ее общие элементы являются врожденными. Как уже говорилось, этими элементами является желательная синхронизация и определенные соотношения звуковых периодов» [71].

В результате одного из проведенных учеными экспериментов, было установлено, что в зависимости от характера воспринимаемого музыкального произведения существенно меняется ритм сердечной деятельности. «Это изменение состояло в том, что в каждом отдельном случае электрокардиограмма испытуемого фиксировала некоторую доминирующую частоту сердечной активности, возникающей под влиянием прослушиваемой музыки. Сердце, несомненно, является весьма чувствительным индикатором эмоционального состояния индивида, так как, находясь под непрерывным контролем центральной нервной системы, оно, по существу, отражает в своем поведении процессы, происходящие в мозге» [78].

Каждое музыкальное произведение, будь то классическая сюита или клубная танцевальная музыка, также обладает своим собственным музыкальным ритмом. Музыкальный ритм, в отличие от мелодии, как правило, не осознается рядовым слушателем, тем не менее по данным некоторых исследований именно ритм оказывает решающее влияние на физиологическое и эмоциональное состояние индивида в процессе музыкального переживания.

Известный английский психофизиолог Грэй Уолтер провел исследование, посвященное влиянию музыкальных ритмов на биоритмы человеческого мозга, и исследовал явление следующего характера: если фликер (так называется прибор, подающий звуковые и световые пульсации), настроить на доминирующую частоту биоритма данного испытуемого, то возникает явление резонанса – доминирующий ритм будет усиливаться благодаря реакции навязывания ритма. В своей книге «Живой мозг» Г. Уолтер так описывал результаты эксперимента: «некоторые из испытуемых видят богатые многоцветные картины, иногда неподвижные, иногда движущиеся. Возникают и простые ощущения, не имеющие зрительного характера. Некоторые испытывают чувства качки, прыжков, даже вращения и головокружения, другие – чувства покалывания и пощипывания кожи. Могут возникать и организованные, напоминающие сны галлюцинации, целые эпизоды, включающие несколько ощущений: испытуемые переживают чувства утомления, смущения, страха, отвращения, злости, удовольствия» [79].

В своей статье «Психология музыкального восприятия» В. И. Петрушин продолжает развивать данное направление исследований и делает следующее предположение: «Если соотнести биоритмы мозга с ритмической пульсацией в музыке, можно увидеть, что чередование звуков со скоростью трех в секунду будет сходно с дельта-ритмом. Этот ритм можно услышать

в «Лунной сонате» Бетховена, во многих ноктюрнах Шопена. Ритмическая пульсация со скоростью 8 звуков в секунду будет напоминать альфа-ритм. Такую скорость движения можно проследить в финале Третьего концерта для фортепиано Бетховена, во многих военных маршах. Скорость звукового движения, соответствующего ритмической частоте бета-ритма, можно проследить в этюдах Шопена, Листа, Паганини» [80].

Есть все основания предполагать, что в процессе восприятия музыкального ритма биоритмы мозга произвольно настраиваются на его частоту. При этом наиболее сильные переживания могут возникнуть в момент резонанса – совпадения доминирующего у данного человека биоритма с частотой музыкально-ритмической пульсации.

Реакция навязывания ритма, при помощи которой физиологи исследуют деятельность мозга, имеет очень важную особенность. Она зависит от свойства нервной системы человека, в частности, от такого ведущего показателя, каким является параметр «сила-слабость».

Исследования показывают, что у лиц со слабой нервной системой, для которой характерна высокая чувствительность, наблюдается более выраженная реакция перестройки биоритмов на сравнительно большую зону частот. Для лиц с сильной нервной системой, обладающих меньшей чувствительностью, реакция навязывания ритма выражается слабее. По сравнению с сильной нервной системой для лиц со слабой нервной системой характерны более высокие коэффициенты навязывания низких частот 4 и 6 Гц.

Перенося эти выводы на процесс музыкального восприятия, мы можем предполагать, что, скорее всего, люди со слабой нервной системой будут гораздо тоньше и глубже чувствовать и переживать содержание музыкальных произведений. Те, кто принадлежит к сильному типу высшей нервной деятельности, будут предпочитать музыку быстрых темпов, громкую и звучащую достаточно долго. Обладатели слабого типа будут тяготеть к спокойной и негромкой музыке [80].

Таким образом, музыка способна оказывать существенное влияние на психофизиологические процессы, протекающие в организме слушателя, она создает физиологическую основу для возникновения эмоций. Влияние музыкальных ритмов и их совпадение с уникальными биоритмами слушателя могут составлять основу для музыкальных предпочтений индивида.

Музыка – одно из самых эмоциональных видов искусств и поэтому близка и понятна каждому человеку. Эмоция – наиболее специфичная и осязаемая сторона музыкального содержания. Возникали даже представления о сути музыки как «языке чувств». Из высказываний и стихов о воздействии музыки на человека можно составить целую антологию – от древнейших времен до сегодняшнего дня. И примечательно, что чем глубже мы заглядываем в историю человечества, тем более яркие восхваления музыке находим [72–76].

Эмоциональное состояние – естественно для человека, и именно эмоциональный мир формировал общение древних племен. Цивилизация и технический прогресс несли с собой всестороннюю рационализацию, регламентацию, ограничение естественного в человеке, в том числе и в отношении его эмоций. И на современном этапе человеческой культуры ценность искусства вообще и музыки в первую очередь состоит не только в создании эмоционального резонанса, адекватного состоянию и самосознанию человека, но и в реабилитации утрачиваемых им свойств, целостности человеческой натуры, в сбережении всего богатейшего комплекса человеческих способностей для успешного существования человека в будущем.

Определение эмоции в музыке можно сформулировать следующим образом: музыкальная эмоция – это процесс, результат, образ и опыт переживания музыки человеком. Музыка живет не в нотных значках на бумаге, а в слуховом опыте человека. И эмоциональные ее характеристики в основном нотами не фиксируются. Изучение этой стороны содержания музыки сопряжено с исследованием областей ее выражения и восприятия, что требует и музыкально-психологического подхода. Психологами поставлен, в частности, следующий вопрос о самом предмете «музыкальные эмоции»: музыка выражает мир эмоций и переживаний, или она формирует определенные стороны и структуры душевной жизни, вне музыки не существующие? На Западе около 1990-х гг. произошел даже раскол психологов на когнитивистов и «эмоционалистов»: первые считают эмоцию в музыке коренящейся в событиях человеческой жизни, вторые считают музыку саму по себе наделенной эмоциональным зарядом. Ответ представляется следующим: музыка и выражает человеческие эмоции, и воздействует на них, и претворяет их в специфические эмоции художественного порядка, и образует эмоции, общие с другими видами искусства, и содержит эмоции, вне музыки не существующие.

Однако жизненные эмоции бывают как положительные, так и отрицательные. Во всех классификациях жизненных эмоций отмечена одна особенность – значительное преобладание отрицательных над положительными. Например, десять врожденных фундаментальных человеческих эмоций по К. Изарду таковы:

1. Интерес – возбуждение.
2. Удовольствие – радость.
3. Удивление – любопытство.
4. Горе – отчаянье.
5. Гнев – ярость.
6. Отвращение – омерзение.
7. Презрение – пренебрежение.
8. Страх – ужас.
9. Стыд – застенчивость.

10. Вина – раскаянье.

Из всех этих эмоций – семь отрицательных (горе, гнев, отвращение, презрение, страх, стыд, вина) и только три положительных (интерес, удовольствие, удивление) [81]. Но такое преобладание не означает, что в жизни человека больше отрицательных эмоций. Такое большое их количество вызвано необходимостью наибольшей дифференциации ради биологического выживания человека: чтобы на небольшую угрозу человек не отвечал смертельным испугом и, наоборот – на смертельную опасность не реагировал легким беспокойством.

Различные отрицательные и положительные эмоции имеют неодинаковое акустическое выражение, когда они имитируются человеческим голосом или воспринимаются на слух. В. Морозов сравнил друг с другом выраженные в пении пять базовых эмоций: радость, горе, гнев, страх и безразличие. Техническими показателями выступали расположение высокой певческой форманты (ВПФ), сила голоса и паузы. При «радости» ВПФ сдвигается в высокую частотную область (2300–3000 Гц), достигая светлого звучания. При «горе» и «гневе» ВПФ понижается, звук темнеет. При «гневе» одновременно повышается сила и интенсивность звука. При «страхе» ВПФ может не быть вообще, сила голоса становится минимальной. Наибольшая величина пауз выявлялась при «страхе» (голос прерывался в 12,6 % случаев), наименьшая – при «безразличии» (звучал почти непрерывно – 2,1 %). Изучая выявленность этих эмоций в пении (пелась фраза «Спи, дитя мое» из «Колыбельной» П. Чайковского) и их распознавание слушателями, исследователь сделал наблюдение о неодинаковой выраженности признаков той или иной эмоции: наиболее выразительно были спеты эмоции горя, гнева, страха и безразличия, радость же была выявлена хуже всего, причем всеми певцами во всех программах. Тот же результат был получен и при изучении реакции слушателей. Точнее всего оценивался страх (86 %), далее гнев (79 %), горе (68 %), безразличие (64 %) – эмоции, у которых обнаружили закрепленные информативные признаки [82].

Вместе с тем, сказанное вовсе не означает, что человек по природе своей есть существо, непрерывно погруженное в мрачный мир отрицательных переживаний и рожденный для этого. У биологов имеется достаточно научных доказательств противоположного характера. У отрицательных эмоций велика видовая дифференциация, но они занимают гораздо меньше зон в мозгу, чем положительные эмоции.

Очень интересен подход, состоящий в изучении взаимодействия и сравнении жизненных эмоций (эмоций, вызванных реальными жизненными событиями) и так называемых художественных (эстетических) эмоций (вызванных в процессе восприятия произведений искусства, в частности музыкального). Существуют разносторонние взгляды на данный вопрос.

Например, Б. М. Теплов полагал, что жизненные эмоции очень сильно влияют на художественные. Прежде всего, они естественно имитируются

самим музыкально-биологическим материалом – человеческим голосом, моторными реакциями. При изучении семантики голоса в акте речи отмечается огромное число эмоциональных состояний, которые могут воспроизводиться таким путем – как положительных, так и отрицательных: причитание, нытье, уверение, поучение, вопрошание, подбадривание, утешение, извинение, упрек, оскорбление, нежность, ласка, сострадание, покорность, презрение, ненависть, ирония, насмешка, радость, жалость, восторг, злорадство, восхищение, боль. Эмоции возбуждения/торможения музыкального темпоритма непосредственно соотносятся с моторной сферой человека. Чувство ритма в основе своей имеет моторную природу [83].

Между жизненными и художественными эмоциями можно указать два полярных вида взаимодействия: согласование и противоречие. При согласовании жизненных и художественных (музыкальных) эмоций оба компонента имеют один, только положительный, психологический знак. При противоречии жизненных и художественных эмоций жизненный компонент наделен отрицательным знаком, а художественный (музыкальный) – положительным. Благодаря непременно участию художественного компонента с его позитивной психологической сущностью, музыкальное целое, как правило, не бывает полностью отрицательным по вызываемой эмоции.

Эстетические же чувства, возникающие при восприятии музыкального произведения в отличие от базовых эмоций, имеющих место в непосредственной жизни, включают в себя комплекс близких по значению настроений, дающих динамическую картину эстетического переживания, которое может быть выражено при помощи многочисленных вербальных определений [17].

Но музыка обладает не только эмоциональным воздействием на человека. Уже в античных источниках мы находим множество свидетельств, говорящих о чудесных исцелениях, достигнутых при помощи музыки. Неоплатоник Боэций в трактате «Наставления к музыке» свидетельствует, что музыканты Терпандр и Арион из Метимны посредством пения избавили жителей Лесбоса и ионян от тяжелых болезней. А Исмений Фиванский, как говорят, избавил от страданий многих беотийцев, которых мучили сильные подагрические боли. Согласно воззрениям древних, каждому ритму пульса соответствовало то или иное заболевание, а ритмы эти располагались по порядку музыкальных чисел. У средневекового итальянского теоретика музыки Джозефа Царлино мы находим свидетельства, как некто Сенократ звуками труб возвратил безумным прежнее здоровье, а Талет из Кандии звуками кифары изгнал чуму. Пророк Давид своим пением и игрой на кифаре излечил библейского царя Саула от приступов тяжелой депрессии. Пророки во время своего действия требовали, чтобы некто искусный начинал играть, ибо «при побуждении их этими сладостными звуками в них вселялась духовная благодать».

Древние считали, что когда человек заболевает, в мелодии его тела закрадываются фальшивые ноты. Даже мысли представляют собой вибрации и могут быть нездоровы, подобно сердцу, печени или легким. И если бы удалось технически зафиксировать музыку тела в здоровом состоянии, то мы получили бы уникальную возможность восстановить нормальные вибрации (вибрации здорового организма) при заболевании.

В 70-х гг. прошлого века эту идею подхватил английский остеопат доктор Питер Гай Мэннерс. Он создал уникальный прибор, который позволяет врачу, держа в руках аппликатор, касающийся кожи пациента, посылать внутрь тела больного звуковой сигнал с частотой от шестидесяти до тридцати тысяч герц. Согласно теории Мэннерса, болезни возникают из-за нарушения гармонического баланса в общей вибрации организма. Общую вибрацию организма составляют отдельные вибрации всех взаимозависимых органов, тканей и молекул. Это значит, что человеческое тело является большим многоуровневым резонатором, состоящим из многочисленных октав биологических систем, в которые изначально заложена возможность гармоничного музыкального взаимодействия. Это же является и показателем здоровья.

Здоровье поддерживается регуляцией гармонических созвучий организма, – утверждает Мэннерс. Когда тоны сердца, печени, селезенки, костей и мускулов гармонизированы между собой, человек пребывает в добром здравии. Но когда какой-то орган сбивается с тона или выбивается из ритма, мы будем чувствовать дискомфорт, пока с помощью какого-нибудь прибора не вернем этому органу присущий ему звук, – поясняет Мэннерс.

В Америке доктор Логан изобрел бандажи для беременных с вмонтированными в них микростереоколонками, которые будущие мамы должны одевать на живот. Пояс соединен с плеером, на котором нужно прослушать специальную музыку на 60 аудиокассетах. Сегодня уже родилось более 1200 детей, слушавших подобранные мелодии в состоянии эмбрионов. Все малыши после рождения прошли стандартные тесты с показателем, в среднем, в четыре раза лучшим, чем у обычных детишек.

В Китае массово выпускают музыкальные альбомы с неожиданными для нас названиями: «Пищеварение», «Бессонница», «Мигрень». Есть также «Печень», «Легкие», «Сердце». Китайцы «принимают» эти музыкальные произведения, как таблетки или лекарственные травы. Подобные музыкальные сборники издаются и в Японии.

Доктор медицины Сергей Шуршаджан и его коллеги провели исследования влияния вокалотерапии на легкие и на другие жизненно важные органы. По результатам исследований они пришли к выводу, что звук, зарождающийся во время пения, только на 15–20 % уходит во внешнее пространство. Остальная часть звуковой волны поглощается внутренними органами, приводя их в состояние вибрации. Звучание больных органов отличается от звучания здоровых. Это неправильное звучание можно скор-

ректировать, научив человека правильно петь, и, кроме получаемого от этого удовольствия, приводить в порядок свой организм без помощи лекарств. Музыкальная терапия вообще и вокалотерапия в частности – редкое по доступности средство для включения резервных возможностей организма и развития его защитных функций. Сергей Шуршаджан утверждает, что «хорошие оперные певцы – люди физически здоровые и, как правило, долгожители. Примадонны редко выходят на пенсию. Если бы в школах вместо непонятных уроков музыки вводились уроки классического пения, больных детей у нас было бы гораздо меньше».

Исследователи из университета итальянского города Кьети пришли к выводу, что классическая музыка укрепляет память человека. Они открыли так называемый «эффект Вивальди», доказав, что регулярное прослушивание его знаменитого симфонического сочинения «Времена года» улучшает свойства памяти у людей. В ходе эксперимента 24 добровольца должны были запомнить ряд чисел, расположенных в определенном порядке. Группа пациентов, которые много часов слушали музыку Антонио Вивальди, справилась с этим заданием намного лучше своих соперников. В определенной степени этот феномен можно объяснить повышенным вниманием и напряжением участников эксперимента, но классическая музыка, бесспорно, стимулирует краткосрочное расширение физиологических возможностей человеческого мозга. В науке уже давно известен «эффект Моцарта», когда маленькие дети, слушающие музыку великого австрийского композитора, быстрее развиваются в интеллектуальном отношении.

В животноводстве, как отмечала еще советская печать, надои молока у коров иногда увеличивались после исполнения по радио музыки Чайковского.

При прослушивании классической музыки проходит физическая боль. Такая музыка просто незаменима при ревматизме. Слушающие классическую музыку больные выздоравливают в два раза быстрее, по сравнению с теми, кто музыку не слушает. В настоящее время ученые многих стран активно занимаются изучением целебного влияния музыки на человеческий организм с тем, чтобы сформулировать четкое представление на этот счет.

Совсем недавно ученые выяснили, что для того чтобы отсрочить возрастное ослабление психики, нужно как минимум десять лет жизни потратить на музыкальное хобби.

О том, что занятия музыкой замедляют старение мозга, ученые твердят уже давно. То же самое говорится в статье нейрофизиологов из Университета Эмори (США), опубликованной в июле 2012 г. в журнале *Frontiers in Human Neuroscience*. Но на этот раз исследователи сделали важное уточнение. Вы можете в молодости потратить на регулярные занятия музыкой около 10 лет, а эффект от этих занятий проявится в старости, несмотря на то, что музыку вы давно забросили [77].

Исследователи сравнивали состояние психики у пожилых людей, имевших в жизни разные увлечения и среди них игру на разных музыкальных инструментах. Высшие когнитивные функции, в том числе память, у 60–80-летних были в лучшем состоянии, если среди их хобби или полупрофессиональных увлечений было музицирование. При этом в сумме на это хобби должно было быть потрачено не менее 10 лет, с перерывами или без них (хотя не исключено, что больший срок занятий влияет на психику еще лучше).

При этом было обнаружено несколько любопытных особенностей. Если занятия музыкой начались до девяти лет, то впоследствии это хорошо скажется на словесной рабочей памяти, на способности запоминать символы и производить с ними какие-то операции. Более позднее начало музыкальных занятий укрепит невербальные когнитивные способности – например, умение ориентироваться в пространстве. Если продолжить музицировать в зрелом возрасте, то это, к примеру, может скомпенсировать низкий образовательный уровень, который обычно отражается в негибкости ума. Музыка эту негибкость в какой-то мере исправит. Словом, занятия музыкой благотворны в любом возрасте.

Все это имеет особое значение, если вспомнить о нейродегенеративных болезнях, которые часто приходят со старостью. Известно, что насыщенная умственная жизнь, которая сопровождает, например, хорошее образование, замедляет наступление болезни Альцгеймера и вообще тормозит ослабление мозговых функций. Очевидно, того же можно добиться и музыкальными занятиями. Следует подчеркнуть, что речь здесь идет не о профессиональном музицировании, а лишь о способе проведения досуга. Так что, возможно, родители, которые водят своих чад в музыкальную школу, в чем-то правы, и для их детей старость наступит позже, чем для тех, кто в это время беззаботно гоняет в футбол.

До самого последнего времени бытовало мнение, что на разных людей музыка воздействует по-разному. Одним для получения комфортного ощущения нужна симфоническая музыка, другим – романс, третьим – рок. Однако исследователи из Медицинской школы Стэнфордского университета (США) утверждают, что одинаковая музыка одинаково действует на людей – по крайней мере, та музыка, которую принято называть классической. К такому выводу ученые пришли в апреле 2013 г. Свои выводы они, как положено, подкрепляют данными *ФМРТ-сканирования* (подразд. 2.2.2).

В проделанном ими эксперименте приняли участие 17 молодых людей обоего пола в возрасте от 19 до 27 лет. Для того чтобы не путаться в данных, полученных на «леворуком» и «праворуком» мозгах, все они были «правшами». В течение девяти минут, пока длилось ФМРТ-сканирование, испытуемые слушали пьесу Уильяма Бойса, английского композитора XVIII в. Пьеса эта чисто инструментальная, для того чтобы звучание слов не мешало восприятию звучания инструментов, а активность мозга, направленная

на распознавание речи, не смешивалась с активностью, направленной на восприятие музыки. Кроме того, пьеса была заведомо незнакома слушателям, чтобы содержимое их памяти также не влияло на чистоту эксперимента.

Исследователи обнаружили иерархическую систему мозговых центров, отвечающих за восприятие музыки: начиналась эта система с низкочастотных слуховых анализаторов, а заканчивалась в высших нервных центрах коры, отвечающих за память, внимание и за планирование мышечных движений. Кроме того, в «прослушивании» музыки участвовали также лингвистические центры – например зона Брока (хотя слов и вообще человеческого голоса в пьесе, как уже говорилось, не было). При этом активность музыкальной сети мозга в разных ее участках проявлялась по-разному: какие-то области работали с музыкой в реальном времени, какие-то включались и выключались по ходу пьесы. Возможно, столь сложная активность связана со структурой самой музыки, когда нам для полного впечатления нужно запоминать и узнавать те или иные звучащие фрагменты.

Все зоны мозга во время прослушивания пьесы возбуждались и работали синхронно, и, что более важно, их активность была схожей у разных людей. Другими словами, мозг разных людей реагирует на музыку примерно одинаково. На основании чего авторы взяли на себя смелость заявить, что высокое социальное значение музыки коренится в общей нейробиологии музыкального восприятия человека [85].

И действительно, разные люди примерно одинаково танцуют под одну и ту же музыку. С другой стороны – авторы для исследования взяли всего одну пьесу одного композитора, так что остается вопрос, как мозг будет реагировать на иную музыку. Впрочем, нельзя не отметить, что ученые исследовали, так сказать, лишь голое восприятие, не обращая внимания на то, нравится участникам эксперимента та музыка, которую они слышали, или не нравится.

Контрольные вопросы

1. Опишите общую структуру слуховой системы человека и поясните назначение каждой ее части.
2. Опишите структуру периферической части слуховой системы.
3. Опишите структуру наружного уха и поясните назначение его элементов.
4. Опишите структуру среднего уха и принцип его работы.
5. Опишите структуру внутреннего уха и роль его основных элементов в обработке акустических сигналов.
6. Что такое кривая абсолютного порога слышимости?
7. Расскажите о воздействии колебаний инфранизких частот на организм человека.
8. Что такое временная интеграция?

9. Что такое дифференциальные слуховые пороги и каковы их значения по частоте, интенсивности и длительности звукового сигнала?
10. Какие типы звуковых сигналов вы знаете? Приведите примеры.
11. Как определяется уровень громкости звукового сигнала в фонах и что такое изофоны?
12. Что такое взвешивающие кривые и как они связаны с изофонами?
13. Что такое абсолютная и относительная громкость? Какова связь между уровнем громкости в фонах с громкостью в тонах?
14. Что такое критические полосы слуха, сколько их, как их ширина зависит от средней частоты и какова их роль в определении громкости сложных звуков?
15. В чем заключается эффект маскировки? Какие виды маскировки вы знаете?
16. Что такое одновременная маскировка и каковы ее особенности в различных ситуациях?
17. В чем состоит временная маскировка, какие ее разновидности и закономерности вы знаете?
18. Опишите феномен бинауральной маскировки и охарактеризуйте ее особенности.
19. В чем состоит эффект бинауральной демаскировки?
20. Охарактеризуйте нелинейные свойства слуха и причины появления субъективных гармоник и комбинационных тонов.
21. В чем состоит механизм временной адаптации слуха?
22. Опишите механизмы локализации источника звука в горизонтальной плоскости.
23. Опишите механизмы вертикальной и глубинной локализации.
24. В чем состоит эффект Хааса и где он используется?
25. Что такое бинауральное суммирование мощности и бинауральное слияние?
26. Что такое высота звука? Опишите основные механизмы определения высоты звука слуховой системой человека. Что такое мел и барк?
27. Как определяется высота сложных звуков?
28. Что такое консонанс и диссонанс? От каких механизмов обработки звуковых сигналов слуховой системой зависит их ощущение?
29. Какие частотные интервальные коэффициенты вы знаете?
30. Дайте определение тембру звучания.
31. Какие физические характеристики звука влияют на тембр звучания?
32. Что такое музыкальная шкала или звукоряд?
33. Дайте общую характеристику принципам формирования музыкальных шкал.
34. Что такое пифагорейская шкала? Каковы ее достоинства и недостатки?

35. Поясните принципы построения натуральной шкалы и ее достоинства и недостатки.
36. Дайте общую характеристику равномерно темперированной шкале и ее особенностей. Что такое стандартная высота тона?
37. Охарактеризуйте особенности восприятия речи.
38. Расскажите о восприятии певческих голосов. Какие типы певческих голосов вы знаете?
39. Как формируются певческие голоса? Что такое певческие форманты? Какие певческие форманты вы знаете?
40. Расскажите о восприятии музыки и ее влиянии на человека.

Список литературы

1. *Алдошина, И. А.* Музыкальная акустика : учеб. / И. А. Алдошина, Р. Приттс. – СПб. : Композитор, 2006.
2. *Zwicker, E.* Psychoacoustics, 2nd ed. / E. Zwicker, H. Fast. – New York. : Springer, 1999.
3. *Howard, D.* Acoustics and Psychoacoustics / D. Howard, J. Angus. – G-B. : Focal-Press, 2001.
4. *Шиффман, Х. Р.* Ощущение и восприятие / Х. Р. Шиффман. – СПб. : Питер, 2003.
5. *Moore, B.* Hearing / B. Moore. – London : Academic Press, 1995.
6. *Moore, B.* Introduction to the psychology of hearing / B. Moore. – N. Y. : Academic Press, 1989.
7. *Bregman, A. S.* Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound / A. S. Bregman. – Cambridge : MIT Press, 1990.
8. *Parncutt, R.* Harmony: Psychoacoustical Approach / R. Parncutt. – N. Y. : Springer, 1990.
9. *Гельфанд, С. А.* Слух / С. А. Гельфанд. – М. : Медицина, 1984.
10. *Блауерт, Й.* Пространственный слух / Й. Блауерт. – М. : Энергия, 1979.
11. *Blauert, J.* Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization / J. Blauert. – Cambridge : MIT Press, MA, 1997.
12. Слуховая система / отв. ред. Я. А. Альтман. – Л. : Наука, 1990.
13. *Zwicker, E.* Audio Engineering and Psychoacoustics: Matching Signals to the Final Receiver, the Human Auditory System / E. Zwicker, T. Zwicker // Journal of Audio Engineering Society. – March 1991. – Vol. 39. – № 3. – P. 1215–1261.
14. Encyclopedia of Acoustics / Ed. M. Crocker. – N. Y. : J. Wiley & Sons, 1997. – V. 1–4.
15. The Psychology of Music / Ed. D. Deutsch. – N. Y. : Academic Press, 1984.
16. *Sloboda, J. A.* The Musical Mind: The Cognitive Psychology of Music / J. A. Sloboda. – Oxford : University Press, 1985.
17. *Морозов, В. П.* Восприятие речи. Вопросы функциональной асимметрии мозга / В. П. Морозов, И. А. Вартанян, В. И. Галунов и др. / под ред. М. Морозова. – Л. : Наука, 1988.

18. *Rossing, T. D.* The Science of Sound / T. D. Rossing. – N. Y. : Adisson-Wesley Publ, 1982.
19. *Stevens, S.* Psychophysics / S. Stevens. – N. Y. : Wiley, 1975.
20. *Данилова, Н. Н.* Психофизиология : учеб. / Н. Н. Данилова. – М. : Аспект Пресс, 2001.
21. Акустика : учеб. для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев / под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Горячая линия-Телеком, 2009.
22. *Moore, B.* Model for the Prediction of Thresholds, Loudness and Partial Loudness / B. Moore, B. Glasberg, T. A. Baer / Journal of Audio Engineering Society. – Vol. 45. – № 4. – April 1997. – P. 224–240.
23. *Bosi, M.* Introduction to Digital Audio Coding and Standards / M. Bosi, R. Goldberg. – Boston : Kluwer Ac. Publishers, 2003.
24. *Никамин, В. А.* Системы пространственного звучания : учеб. пособие / В. А. Никамин. – СПб. : Корона-Принт, 2004.
25. Слуховая система / отв. ред. Я. А. Альтман. – Л. : Наука, 1990.
26. *Ковалгин, Ю. А.* Стерефония / Ю. А. Ковалгин. – М. : Радио и связь, 1989.
27. *Аннерт, В.* Техника звукоусиления / В. Аннерт, Ф. Стеффен. – М. : Эра, 2003.
28. Litovsky et al. The precedence effect. / J. Acoustic. Soc. Am, 1999. – Vol. 106. – № 4.
29. *Toole, F.* Sound Reproduction / F. Toole. – G-B. : Focal-Press, 2008.
30. *Vogel, M.* Die Enharmonik der Griechen / M. Vogel. – Düsseldorf, 1963.
31. *Лебедев, С.* Учение о хроматике Маркетто из Падуи / Проблемы теории западноевропейской музыки (XII–XVII вв.) / С. Лебедев. – М. : Наука, 1983.
32. *Холопов, Ю. Н.* Гармония. Теоретический курс / Ю. Н. Холопов. – М. : Наука, 2003.
33. Greek Musical Writings. Vol. II: Harmonic and Acoustic Theory, edited by Andrew Barker. Cambridge, 1989.
34. *Stumpf, K.* Konsonanz und Konkordanz / Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft. H. 6, Lpz., 1911.
35. *Roederer, J.* The Physics and Psychophysics of Music / J. Roederer. – N. Y. : Springer-Verlag, 1994.
36. *Plomp, R.* Aspects of Tone Sensation / R. Plomp. – London : Academic Press, 1976.
37. *Kostec, B.* Soft Computing in Acoustics / B. Kostec. – N. Y. : Physica-Verlag, 1999.
38. *Galembo, A.* Effects of Relative Phases on Pitch and Timbre in the Piano Bass Range. J. Acoust / A. Galembo, A. Askenfelt, L. L. Cuddy, F. A. Russo. – Soc. Am. – 2001. – 110 (3). – P. 1649–1666.
39. *McAdams, A.* Auditory Signal Processing: Psychophysics, Physiology and Modeling / A. McAdams, D. de Cheveigné, S. Collet. – N. Y. : Springer-Verlag, 2004.
40. The New Grove Dictionary of Music and Musicians / Ed. Sadie S. – London : Macmillan Press, 1994. – Vol. 1–20.

41. *Hall, D.* Musical Acoustics: An Introduction. Belmont. California: Wadsworth Publishing Company, 1980.
42. Музыкальная энциклопедия. – М. : Сов. Энциклопедия, 1981. – Т. 1–6.
43. <http://www.oreanda.ru/ru/news/20090625/culture/article398968>.
44. http://sys12-today.msnbc.msn.com/id/3077403/ns/technology_and_science-science.
45. *Гиршман, Я. М.* Пентатоника и ее развитие в татарской музыке / Я. М. Гиршман. – Москва, 1960.
46. *Герцман, Е. В.* Пифагорейское музыкознание. Начала древнегреческой науки о музыке / Е. В. Герцман. – СПб. : Гуманитарная академия, 2003.
47. *Щетников, А. И.* Развитие учения о музыкальной гармонии от Пифагора до Архита / А. И. Щетников // Пифагорейская гармония: исследования и тексты. – Новосибирск: АНТ, 2005. – С. 25–65.
48. *Godwin, J.* The harmony of the spheres: A sourcebook of the Pythagorean tradition in music / J. Godwin. – Rochester : Inner Traditions Int., 1993.
49. *Гуляницкая, Н. С.* Додекамодалная система Царлино / Н. С. Гуляницкая // История гармонических стилей : сб. трудов ГМПИ им. Гнесиных. – М., 1987. – Вып. 92.
50. *Сушкова, Н.* Царлино и Вичентино (к вопросу о теоретических дискуссиях в Италии середины XVI века) / Н. Сушкова // Из истории теоретического музыкознания : сб. трудов МГК. – М., 1990. – С. 32–45.
51. *Шерман, Н.* Формирование равномерно-темперированного строя / Н. Шерман. – М. : Музыка, 1964.
52. *Волконский, А. М.* Основы темперации / А. М. Волконский. – М. : Композитор, 1998.
53. *Корнилова, Е. Н.* Риторика – искусство убеждать / Е. Н. Корнилова. – М. : УРАО, 1998.
54. *Сопер, П. Л.* Основы искусства речи / П. Л. Сопер. – М. : Феникс, 2006.
55. *Почикаева, Н. М.* Основы ораторского искусства и культуры речи / Н. М. Почикаева. – Феникс, 2003.
56. *Кузнецов, И. Н.* Риторика, или Ораторское искусство / И. Н. Кузнецов. – М. : Юнити-Дана, 2004.
57. Античные риторики / Собрание текстов, статьи, комментарии и общая редакция А. А. Тахо-Годи. – М. : Изд-во Московского университета, 1978. – Серия «Университетская библиотека».
58. Античная теория языка и стиля : Антология текстов. – СПб., 1996.
59. *Лосев, А. Ф.* История античной эстетики. Аристотель и поздняя классика / А. Ф. Лосев. – М. : Искусство, 1975.
60. *Петровский, Ф.* Цицерон. Три трактата об ораторском искусстве / Ф. Петровский. – М. : Наука, 2002.
61. *Кузнецова, Т. И.* Ораторское искусство в Древнем Риме / Т. И. Кузнецова, И. П. Стрельникова. – М. : Наука, 2006.
62. *Гарбузов, Н. А.* Внутризонный интонационный слух и методы его развития / Н. А. Гарбузов. – М. : Музгиз, 1951.

63. *Морозов, В. П.* Искусство резонансного пения. Основы резонансной теории и техники / В. П. Морозов. – М. : МГК, ИП РАН, Центр «Искусство и Наука», 2008.

64. *Подкопаев, М. И.* О методологических основах содержания и проектирования курса вокальной методики (на основе резонансной теории пения) / М. И. Подкопаев // Вопросы вокального образования. Методические рекомендации Совета по вокальному искусству при Мин. Культуры РФ (для преподавателей вузов и средних специальных учебных заведений). – М. – СПб. : 2006.

65. *Ржевкин, С. Н.* Некоторые результаты анализа певческого голоса / С. Н. Ржевкин // Акуст. журн., 1956. – Т. 2. – Вып. 2. – С. 205–210.

66. *Морозов, В. П.* Тайны вокальной речи / В. П. Морозов. – Л. : Наука, 1967.

67. *Sundberg, J.* The Science of the Singing Voice / J. Sundberg. – Illinois. : Dekalb, 1987.

68. *Titze, I. R.* Principles of Voice Reproduction / I. R. Titze. – N. Y. : Prentice-Hall, 1994.

69. *Stevens, K. N.* Articulation-Acoustic-Auditory Relationships / K. N. Stevens // The Handbook of Phonetic Sciences. – Oxford, 1999.

70. *Блум, Ф.* Мозг, разум и поведение / Ф. Блум, А. Лезерсон, Л. Иофстедтер. – М. : Мир, 2006.

71. *Гарбузов, Н. А.* Зонная природа динамического слуха / Н. А. Гарбузов. – М. : Музгиз, 1999.

72. *Рубинштейн, С. Л.* Исследования по психологии восприятия / С. Л. Рубинштейн. – М. : Издательство Академии Наук СССР, 1948.

73. *Блинова, О. А.* Процесс музыкальной психотерапии: систематизация и описание основных форм работы / О. А. Блинова // Психологический журнал. – М., 1998 – № 3. – С. 106–117.

74. *Величковский, Б. М.* Психология восприятия / Б. М. Величковский, В. П. Зинченко, А. Р. Лурия. – М. : издательство МГУ, 1973.

75. *Кирнарская, Д. К.* Музыкальное восприятие / Д. К. Кирнарская. – М. : Искусство, 1997.

76. *Выготский, А. С.* Психология искусства / А. С. Выготский. – М. : Искусство, 1965.

77. http://www.frontiersin.org/Journal/Abstract.aspx?ART_Doi=10.3389/fnhum.2012.00198&name=Human_Neuroscience&x=y.

78. *Марахасин, В. С.* Эксперименты по восприятию музыки в аспекте физиологии / В. С. Марахасин, В. М. Цехановский // Творческий процесс и художественное восприятие. – М. : Наука, 1987.

79. *Уолтер, Г.* Живой мозг / Г. Уолтер. – М. : Наука, 1966.

80. *Петрушин, В. И.* Психология музыкального восприятия / В. И. Петрушин // Музыкальная психология и психотерапия, 2007. – № 2. – С. 53.

81. *Изард, К. Э.* Психология эмоций / К. Э. Изард ; пер. с англ. – СПб. : Питер, 1999.

82. *Морозов, В. М.* Биофизические основы вокальной речи / В. М. Морозов. – Л. : Наука, 1977.

83. *Теплов, Б. М.* Психологические вопросы художественного воспитания / Б. М. Теплов // Известия АПН РСФСР. – М. – Л. : 1947. – № 11. – С. 56.

84. *Ражников, В. Г.* Партитурная транскрипция / В. Г. Ражников // Вопросы психологии, 1980. – № 1.

85. *Menon, V.* New study shows different brains have similar responses to music / V. Menon, D. Levitin // European Journal of Neuroscience. – 2013. – April 11.