

# Оглавление

*Введение. О звуковом разуме: партнерство*

*между звуком и мозгом* .....11

## **ЧАСТЬ I. Как работает звук**

**Глава 1.** Сигналы из внешнего мира ..... 25

**Глава 2.** Сигналы внутри головы ..... 42

**Глава 3.** Обучение: соединение внешних и внутренних сигналов .. 68

**Глава 4.** На пути к слушающему мозгу ..... 90

## **ЧАСТЬ II. Наше звуковое “я”**

**Глава 5.** Музыка — это джекпот: чувствуем, мыслим,

двигаемся, ощущаем .....113

**Глава 6.** Ритм: снаружи и внутри головы ..... 128

**Глава 7.** Звук — основа речи ..... 147

**Глава 8.** Музыка и речь: партнерство ..... 176

**Глава 9.** Двухязычный мозг ..... 197

<b>Глава 10.</b> Певчие птицы . . . . .	215
<b>Глава 11.</b> Шум: прекратите шуметь, у меня мозги лопаются . . . . .	231
<b>Глава 12.</b> Звуковой разум и старение . . . . .	252
<b>Глава 13.</b> Звук и здоровье мозга: спортсмены и сотрясения . . . . .	266
<b>Глава 14.</b> Наше звуковое прошлое, настоящее и будущее . . . . .	282
<i>Благодарности</i> . . . . .	297
<i>Словарь терминов</i> . . . . .	303
<i>Примечания</i> . . . . .	307

**ЧАСТЬ I**  
**Как работает звук**

# Глава 1

## Сигналы из внешнего мира

Эта вводная глава рассказывает о сигналах, раздающихся за пределами нашей головы, — о *звуке*. Звук — это всего лишь перемещающиеся туда-сюда молекулы воздуха. Замечательно, что этот простой механизм создает бесконечное разнообразие звуков — от Баха до скворчания яичницы на сковородке, от песни “*Rocky Raccoon*” до копающегося в помойном баке енота. Звуки бывают громкими и тихими, высокими и низкими, консонансными или диссонансными, быстрыми и медленными, грубыми, визгливыми, хаотичными, полифоническими, свистящими или монотонными. Предлагаю вам прочувствовать красоту свойств звука — его компонентов, о которых мы будем говорить вновь и вновь по мере исследования звукового разума.

Звук — это движение. Когда дергают гитарную струну, она заставляет двигаться воздух в ближайшем окружении. На рис. 1.1 изображены колебания гитарной струны после щипка. Слева показана струна в свободном состоянии, и справа от нее — дюжина маленьких молекул воздуха. Когда гитарная струна находится в покое, локальное атмосферное давление составляет около 14,7 фунта на квадратный дюйм — давление воздуха на уровне моря. Когда струну дернули, она быстро отклоняется вправо и молекулы воздуха прижимаются ближе друг к другу, создавая более высокое давление\*.

\* Это очень-очень небольшая перемена давления. Если я правильно использую формулы и единицы измерения, щипок гитарной струны поднимает атмосферное давление от 14,7 до 14,70003 фунта/дюйм<sup>2</sup>.

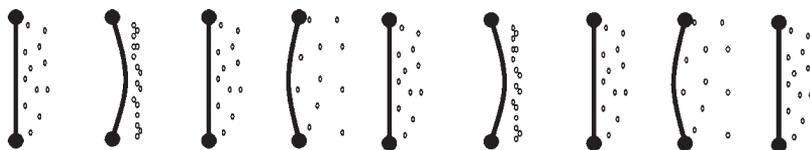


Рис. 1.1. Струна сдвигает окружающие ее молекулы воздуха.

Затем, через очень небольшой промежуток времени (сотые или тысячные доли секунды в зависимости от высоты ноты), гитарная струна движется в обратном направлении, минует исходное положение и смещается чуть левее. Тогда молекулы воздуха справа опять рассеиваются, и давление снижается. Но молекулы не возвращаются сразу к исходному состоянию, как было до натяжения струны. Теперь они рассеяны чуть в большей степени (занимают больший объем) и, следовательно, создают меньшее давление, чем было до первого движения струны. Затем они опять сжимаются, и опять рассеиваются, и еще, и еще, каждый раз чуть слабее, и, наконец, движение прекращается, вибрация затихает, звук умирает. Движение было звуком, и когда движение прекратилось, прекратился и звук.

## Компоненты звука

Большинство звуков определяется несколькими *компонентами* (рис. 1.2), как видимый предмет определяется формой, цветом, материалом и размером. Поскольку звук невидим, компоненты звука не так очевидны, но они чрезвычайно важны для осмысления звука. Я считаю, что если думать о звуке в терминах составляющих его компонентов — признавая важность того, что происходит с движущимися молекулами воздуха, — то его обработка в мозге становится еще более удивительной. Чтобы проследить за этими чудесными компонентами, я считаю, что полезным организующим прин-

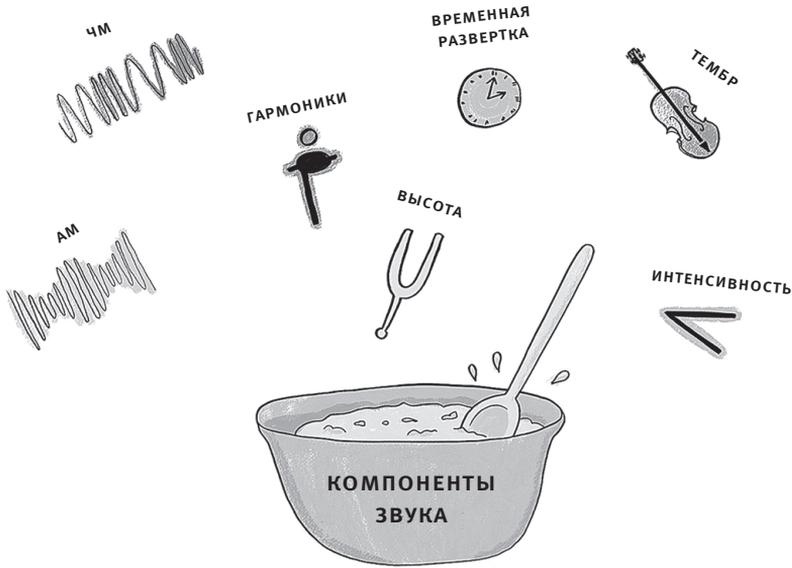


Рис. 1.2. Бесконечное разнообразие звуков возникает из-за движения воздуха и описывается небольшим количеством компонентов.

ципом является представление о звуке в терминах *высоты*, *временной развертки* и *тембра*.

## Высота

Высота — это то, что отличает “высокий” звук от “низкого”. Звук флейты мы называем высоким, а звук тубы — низким. То, что мы слышим и описываем этими терминами, является проявлением физического свойства *частоты*. Мы слышим высокий звук, когда колебания от высокого давления воздуха к низкому происходят очень быстро — с высокой частотой. Низким звукам соответствуют более медленные изменения давления воздуха — с низкой частотой (рис. 1.3). Высота звука — это категория восприятия, а частота — измеряемое

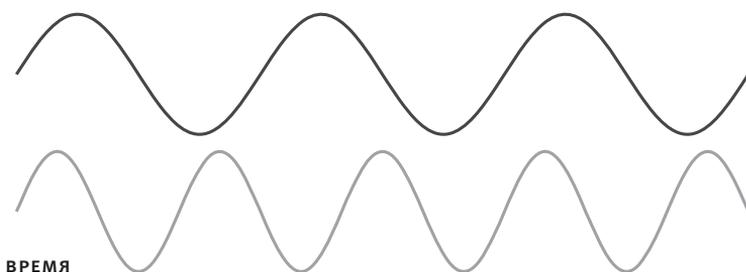


Рис. 1.3. Серая волна описывает больше циклов (имеет большую частоту), чем черная, и поэтому звучала бы на более высокой ноте.

физическое свойство. Нам следует хорошо понимать разницу между высотой и частотой, поскольку они не всегда идеально коррелируют.

Частота не в качестве научной меры высоты звука, а как слово английского языка означает число каких-то событий за фиксированный интервал времени. Вы можете получать зарплату два раза в месяц. В городе Тампа во Флориде за год в среднем бывает 78 гроз. Я получаю спам по электронной почте 22 раза в неделю. Во всех этих случаях речь идет о частоте. Число колебаний давления воздуха в секунду отличает высоту звучания флейты от высоты звучания тубы. Число подобных событий в единицу времени (в секунду) измеряется в герцах (сокращенно Гц). Человеческое ухо воспринимает частоту колебаний давления воздуха в диапазоне от 20 до 20 000 Гц. Высоко звучащая флейта издает звуки с частотой от 250 до 2500 Гц, а низко звучащая туба — от 30 до 380 Гц. Забавно, что эти диапазоны частично перекрываются! Непременно напишу концерт для тубы и флейты, где более высокую партию будет исполнять туба.

Однако между частотой звука и высотой, которую мы слышим, не всегда соблюдается идеальная корреляция. Если мы улавливаем высоту звука (если этот звук можно пропеть), частота, на которой мы его пропоем, называется *основной частотой*. Волновые линии на рис. 1.4 имеют одинаковое коли-

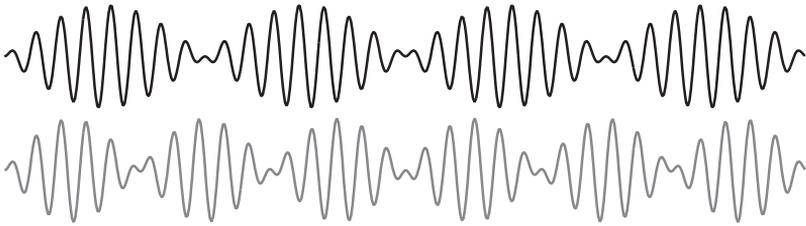
**ВРЕМЯ**

Рис. 1.4. Черная и серая волны имеют одинаковую частоту. Однако скорость модуляции разная, то есть звук, обозначенный серой волной, включается и выключается быстрее, и поэтому он звучит выше, чем звук, обозначенный черной волной. Более быстрая модуляция звука, происходящая из-за более быстрых колебаний голосовых связок у женщин, объясняет более высокие голосовые ноты при произнесении одних и тех же слов.

чество пиков и провалов (примерно 35), так что номинально они имеют одну и ту же частоту. Однако они включаются и выключаются (модулируются) с разной скоростью. И высота слышимого нами звука определяется скоростью модуляции, а не частотой модулируемой волны.

Примером служит человеческий голос. Высота (основная частота) человеческой речи варьирует в диапазоне от 50 до 300 Гц. Основная частота речи соответствует скорости открытия и закрытия голосовых складок, приводимых в движение нашим дыханием. Скорость движения голосовых складок у мужчин самая низкая, так что у них более низкие голоса, а у детей — самая высокая, и голоса у них высокие. Интересно, что высота голоса разная не только у разных индивидуумов и разных полов, но связана и с некоторыми другими неожиданными факторами. Различия в основной частоте в целом наблюдаются у людей, говорящих на разных языках<sup>1</sup>, а также в разных демографических группах людей, говорящих на одном и том же языке<sup>2</sup>. Возможно, вы и по себе заметили, что двуязычные люди обычно говорят на одном языке на более высоких нотах, чем на другом<sup>3</sup>.

## Тембр

В музыке тембр — важнейший параметр, позволяющий различить два инструмента, исполняющих одну и ту же ноту. В речи это главное средство для различения одного звука (гласного или согласного) от другого. Мужчина и женщина произносят одно и то же: основная частота (высота голоса) позволяет определить, кто есть кто. Женщина произносит два разных слова: тембр помогает отличить ее “со” от “су”. Физической мерой высоты звука является основная частота, а тембр определяется *гармониками* — более высокими частотами, чем основная частота.

Полезно знать, из каких частот состоит конкретный звук. Речь идет о так называемом звуковом спектре. Спектр камертона состоит из одной-единственной частоты и поэтому представляет собой одну тонкую вертикальную линию, как на верхней панели на рис. 1.5. У этого звука нет гармоник, только основная частота. Естественный звук, такой как “до” первой октавы в исполнении тромбона или кларнета, имеет пик в спектре на основной частоте “до” первой октавы, соответствующей 262 Гц, а также дополнительные пики на частотах, кратных основной частоте (524, 786 Гц и т. д.) Это и есть *гармоники* (гармонические обертоны). Как показано на средней и нижней панели на рис. 1.5, не все гармоники обладают одинаковой энергией. Относительный энергетический уровень гармоник является характеристикой тромбона и кларнета и объясняет, почему мы слышим разницу между ними. Уникальный характер гармоник определяется формой и конструкцией инструмента, производящего звук. Аналогичным образом форма и положение языка, губ и носа определяют спектр гармоник, характеризующих разные звуки речи.

В зависимости от положения губ и языка и от объема проходящего через рот и нос воздуха мы изменяем спектр издаваемого звука (какие-то из гармоник усиливаются), как показано на рис. 1.6. Хотя в спектре двух гласных звуков есть

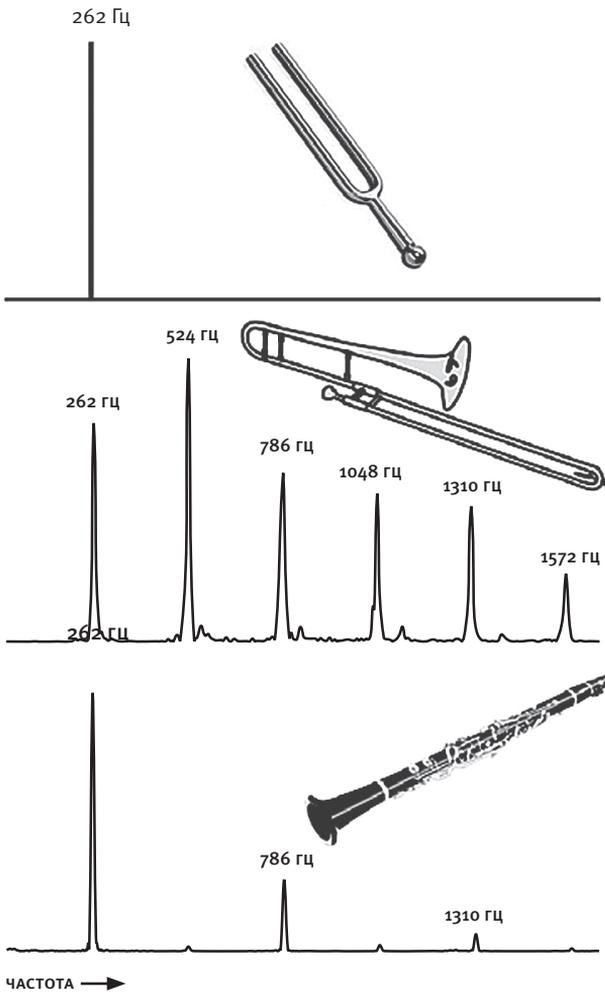


Рис. 1.5. Спектр камертона представляет собой единственную вертикальную линию на одной конкретной частоте — в данном случае 262 Гц, что соответствует ноте до первой октавы. В звуковом спектре инструмента, исполняющего ноту до, есть пик на частоте 262 Гц, а также несколько гармоник на кратных частотах.

Звук “до” первой октавы в исполнении тромбона или кларнета имеет разный рисунок гармоник из-за резонансных характеристик этих инструментов. Спектры помогают понять, почему одна и та же нота до первой октавы звучит по-разному в исполнении разных инструментов (по оси  $x$  отложены частоты, по оси  $y$  — энергия).

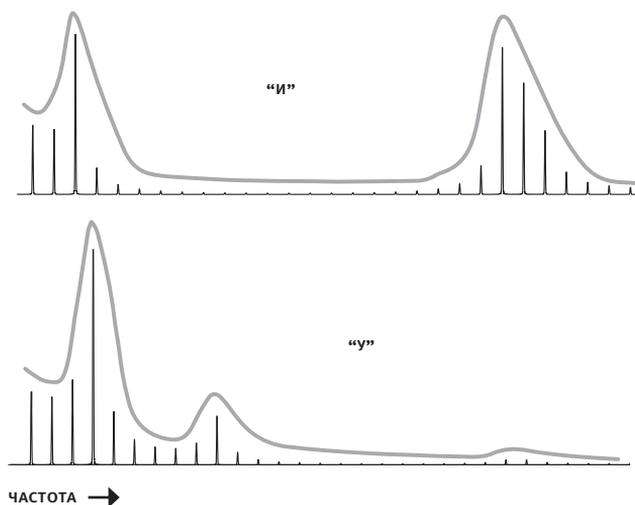


Рис. 1.6. Вверху: спектр звука “и”, как в слове “лик”. Внизу: спектр звука “у”, как в слове “лук”. Оба звука имеют одинаковую основную частоту, но распределение энергии в гармониках различается принципиальным образом (по оси  $x$  отложены частоты, по оси  $y$  — энергия).

пики, отстоящие друг от друга на 100 Гц (поскольку в данном примере основная частота составляет 100 Гц), высота пиков, изображенных серыми линиями, очень разная. Это речевой аналог разницы между звуками тромбона и кларнета. В случае звука “и” два максимума серой линии приходятся на частоты 300 и 2300 Гц, в случае звука “у” они располагаются примерно на частотах 400 и 1000 Гц. Спектр речи имеет выпуклости — области с максимумом энергии, называемые формантами. Интересно, что эти полосы акустической энергии достаточно похожи у разных людей. Человек с высоким голосом имеет пики для звука “у” где-то в районе частот 400 и 1000 Гц, как и человек с низким голосом.

Таким образом, *тембр* — это восприятие звука, связанное с его *гармоническим* содержанием. Расположение гармоник и их относительная высота — физические свойства звука, позволяющие нам по тембру определять разницу между

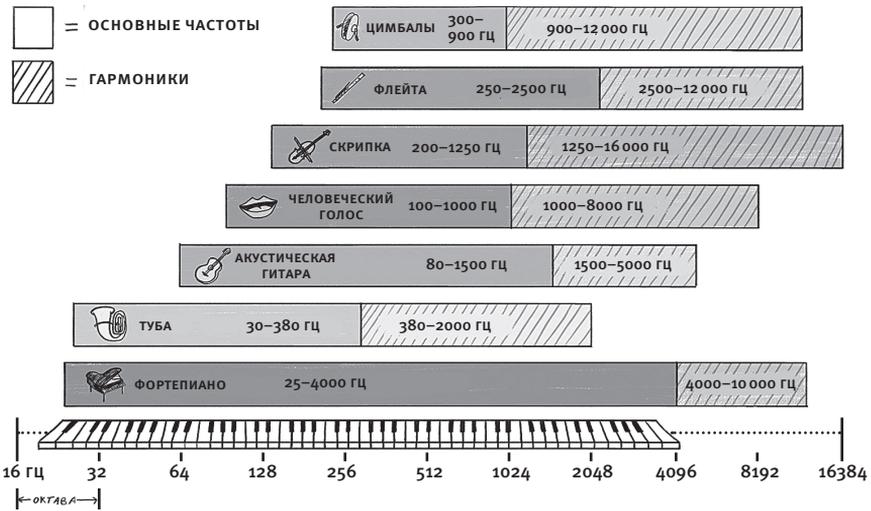


Рис. 1.7. Полный диапазон частот голоса и музыкальных инструментов. Слева показан диапазон основных частот, справа — диапазон гармоник.

двумя инструментами или двумя голосами. В речи группы гармоник выделяются в спектре конкретных слов или слогов. Рисунок 1.7 иллюстрирует полный диапазон частот (основных частот и гармоник) голоса и некоторых музыкальных инструментов.

## Временная развертка

До сих пор мы говорили о камертоне, отдельных музыкальных нотах и гласных — все это примеры звуков, устойчивых на протяжении какого-то времени. Однако существует группа звуков, для которых определяющей характеристикой является время — не в том смысле, когда начинается и заканчивается звук, как слог или музыкальная нота, а в том смысле, как и когда звук развивается во времени. К этой группе от-

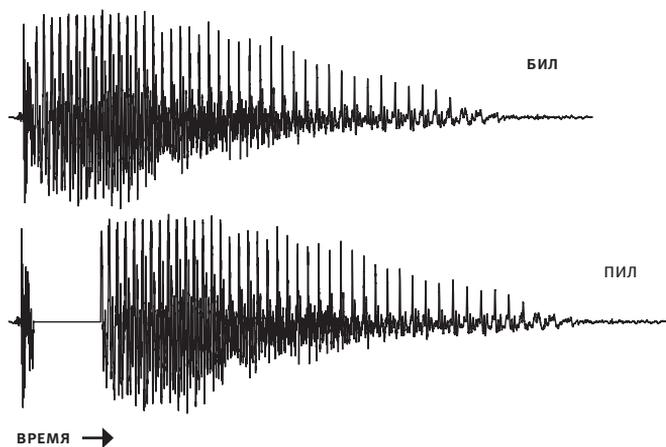


Рис. 1.8. “Бил” превращается в “пил” за счет добавления паузы длительностью  $1/20$  с до начала произнесения гласного звука (по оси  $x$  отложено время, по оси  $y$  — энергия).

носятся согласные звуки. При произнесении некоторых согласных звуков временная развертка играет важнейшую роль.

Произнесите вслух слово “был”. А потом слово “жил”. Можете описать, чем различаются механические движения вашего рта? Это довольно просто. В первом случае ваши губы смыкаются, а язык занимает некую нейтральную позицию. Во втором случае губы слегка приоткрыты, а задняя часть языка прижата к небу. А теперь скажите “бил” и “пил”. Это сложнее. В чем тут разница? Механическая разница между произнесением “б” и “п” не так уж очевидна. Язык и губы в обоих случаях находятся фактически в одном и том же положении. Основное отличие заключается во временной развертке — когда вы начинаете произносить гласную, то есть когда голосовые складки начинают издавать звук “и”. Произнося слово “бил”, вы включаете голос почти сразу. Однако при произнесении слова “пил” между тем, как ваши губы раскрываются, и тем моментом, когда вы начинаете произносить гласный звук, имеется очень короткий промежуток времени.

В верхней части рис. 1.8 изображена звуковая волна слова “бил”. В нижнюю волну я включила паузу длительностью  $1/20$  секунды. Все колебания двух линий идентичны, за исключением этой добавленной паузы. Небольшой паузы до начала произнесения “и” достаточно, чтобы вторая волна отчетливо звучала как “пил”. Различие во времени в несколько долей секунды создает значительное различие в речи. Это одна из многих причин, почему для обработки таких едва заметных изменений звука нам с вами требуется сверхбыстрый слуховой мозг.