

- с приобретенными в младенчестве поведенческими навыками, направляемыми зрением, и их развитием?
17. Как с помощью клинообразной призмы можно продемонстрировать адаптивность зрительной системы? Отвечая на этот вопрос, расскажите также и о том, почему после снятия призмы, ношение которой привело к адаптации, возникает кратковременное явление, называемое отрицательным последействием, т. е. почему поле зрения кажется смещенным в направлении, обратном тому, в котором оно было смещено сразу после надевания призмы.
 18. Почему активные движения, выполняемые самим испытуемым, важны для его адаптации к искажению, вызываемому призмой? В какой мере представители разных биологических видов способны адаптироваться к оптическому искажению? Какую роль в адаптации к стойкому оптическому искажению играет обучение?
 19. Как старение организма влияет на зрительную систему? Как с возрастом изменяются хрусталик и зрачок? Как старение оказывается на зрительных процессах? Принимая во внимание такие возрастные заболевания, как катаракта, пресбиопия, сенильный миоз, макулодистрофия и глаукома, расскажите о влиянии возраста на остроту зрения.

ГЛАВА 12

Слуховая система

Эта и две последующие главы посвящены слуху и аудиальной системе. По степени изученности слуховая система уступает лишь визуальной, и между взаимодействиями индивидуума с внешней средой, возможными благодаря этим двум сенсорно-перцептивным системам, много общего. Слух — уникальный источник жизненно важной информации о том, что происходит в непосредственной близости от нас, а аудиальная система — одна из самых «бдительных» сенсорно-перцептивных систем: она всегда начеку и в любой момент готова к восприятию звуковых сигналов. Воистину мир, в котором мы живем, наполнен звуками. Прислушайтесь на мгновение к тем звукам, которые окружают и раздражают вас, и попытайтесь разобраться в звуковом разнообразии, которое на вас воздействует. Некоторые из этих звуков — всего лишь шум, случайные звуки, производимые заполнившими наш мир машинами, — гул, скрежет, лязг и скрип, — которые в большинстве случаев не несут никакой информации. Однако часть слышимых вами звуков несет в себе полезную информацию о том, что происходит в непосредственной близости от вас. В первую очередь это относится к тем звукам, с помощью которых мы определяем местоположение объектов. Складывается такое впечатление, что мгновенное осознание расположения многих источников звуков по отношению к нам самим происходит без колебаний и усилий.

Слух играет важную роль в жизни многих животных: он не только жизненно важен для их общения между собой, но для многих биологических видов является и основой, на которой базируется их социальная структура. С помощью голосовой коммуникации и слуха многие птицы и млекопитающие обмениваются между собой жизненно важной информацией о взаимном узнавании и приближающейся опасности. Эволюция уникального голосового аппарата человека и большого, имеющего сложную структуру мозга создала основу для возникновения единственной в своем роде формы звуковой коммуникации с использованием языка. В последующих главах, и прежде всего в главе 14, об этой и других функциях слуха будет рассказано более подробно.

В этой главе мы расскажем об аудиальных стимулах и об их свойствах, а также о физиологических явлениях и процессах, протекающих в аудиальной системе и являющихся основой звуковосприятия. Мы также опишем некоторые патологии слуха. Начнем же мы с описания физического стимула аудиальной системы — звука.

Физический стимул

Звуки, которые мы слышим, являются результатом преобразования определенной формы механической энергии и представляют собой паттерны последовательных возмущений давления, происходящих в разных средах — жидких, твердых или газообразных. Большинство воспринимаемых нами звуков передается по воздуху. Так, стоит лишь ударить по камертону — и он начинает вибрировать, благодаря чему мы и слышим звук: колебания ветвей камертона создают последовательность чередующихся компрессий, или сжатий, и декомпрессий, или разрежений окружающего их воздуха (рис. 12.1).

Типичный объект, издающий звуки в результате вибрации — репродуктор стереосистемы или радио. Работающий конусообразный репродуктор то вытесняет воздух, что вызывает компрессию (сжатие) молекул последнего, то втягивает его, следствием чего становится некоторый вакуум, или разжение воздуха. Громкоговоритель совершает сотни или даже тысячи колебаний в секунду, создавая определенный паттерн чередующихся сгущений и разрежений воздуха, расходящийся в разные стороны от него. Паттерн изменений давления воздуха, представленный в виде серий пиков и подошв, называется **звуковой волной**. Как станет ясно из последующего изложения, природа воспринимаемых нами звуков напрямую зависит от физических характеристик звуковой волны.

Звуковая волна простейшего типа представляет собой волну, вызывающую последовательные изменения давления воздуха во времени; она имеет стабильную форму **синусоидальной волны** с неизменным паттерном. График сжатий и разрежений простой звуковой волны, исходящей из определенной точки пространства, представлен на рис. 12.2. Полное изменение давления, включающее сжатие, разжение и повторное сжатие, представляет собой единицу звука, называемую **циклом**.

Хотя звуковые волны перемещаются из одной точки пространства в другую в воздушной среде, ни вибрации, ни движения самой среды при этом не происходит. Иными словами, молекулы образующих воздух веществ не перемещаются вместе со звуковой волной, при движении волны в воздушной среде они скорее располагаются вдоль нее. Визуальной аналогией распространения звуковой волны является картина, когда спокойная поверхность пруда приходит в движение от брошен-

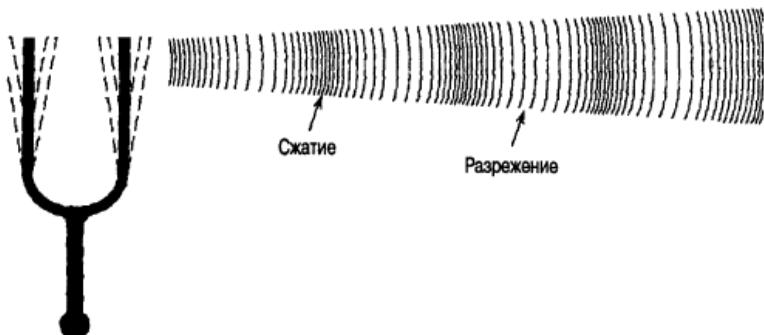


Рис. 12.1. Вибрация камертона

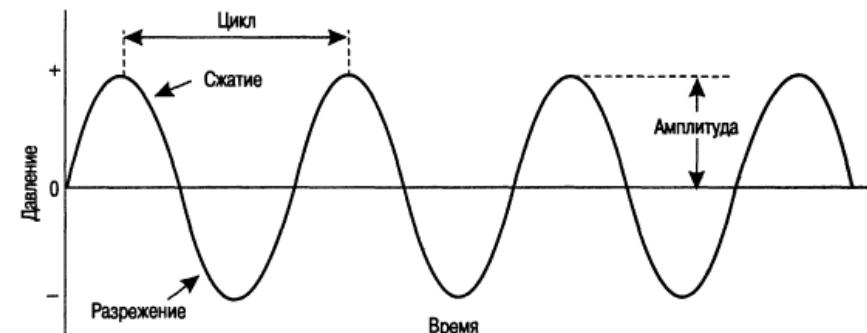


Рис. 12.2. Графическое изображение изменений давления — чередования сжатий и разрежений, вызванных простой звуковой волной

График отражает изменение давления воздуха в точке пространства, находящейся на определенном расстоянии от источника звука (ордината) во времени (абсцисса). На рисунке также показана продолжительность одного полного цикла движения волны от определенной точки в пространстве (т. е. полного цикла изменений давления). Полный цикл равен периоду времени между двумя пиками волны. Частота звуковой волны равна количеству полных циклов в секунду. Амплитуда волны, показанная на рисунке как ее высота, отражает степень сжатия (или разрежения), создаваемого данной звуковой волной

ного в него камня. Упавший в воду камень вызывает паттерн возмущений, которые воспринимаются наблюдателем как череда концентрических окружностей, расходящихся все дальше и дальше от места падения камня, но не вызывающие перемещение воды.

Звуки возникают только в определенной среде, способной передавать колебания давления, т. е. звуки не могут существовать в вакууме, ибо вакуум нельзя подвергнуть компрессии (сжатию). Более того, скорость распространения звука (v) зависит от физических свойств среды, и в твердых телах она выше, чем в жидкости или в газе. Например, в воде звук распространяется в 4, а в стали или в стекле — в 16 раз быстрее, чем в воздухе (скорость распространения звука в воздухе равна примерно 335 м/с). Общее правило таково: при увеличении плотности среды скорость звука в ней увеличивается. Скорость распространения звука зависит также и от температуры среды. Так, при увеличении температуры воздуха на 1 °C скорость распространения звука в нем увеличивается на 61 см/с.

Основными физическими характеристиками звуковых волн являются частота, амплитуда, или интенсивность, и сложность. Ниже мы рассмотрим каждую из этих характеристик отдельно и одновременно расскажем об их *психологических* эффектах (о высоте, громкости и тембре соответственно).

Частота

Одной из характеристик звуковых волн, свидетельствующей о том, насколько быстро протекает цикл изменений давления, является **число циклов изменения давления** (т. е. переходов от сжатия к разрежению и обратно), происходящих в течение 1 с. Она называется **частотой** (f) и измеряется в герцах (Гц); единица измерения частоты, названная в честь немецкого физика Генриха Герца (1857–1894), равна числу изменений звукового давления, или циклов, в секунду. Так, если частота звука рав-

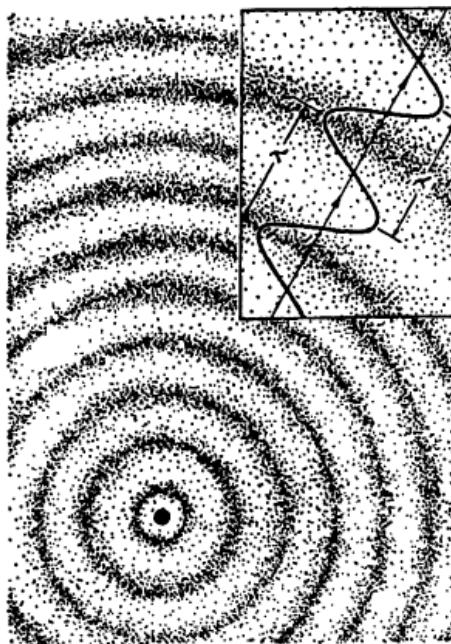


Рис. 12.3. Источник звука представлен в виде центра концентрических окружностей. Молекулы окружающих воздух веществ распределены вокруг него так, как показано на рисунке: расстояние между одни молекулами меньше, между другими – больше, что соответствует сжатию и разрежению воздуха. В правом верхнем углу это же чередование сжатий и разрежений представлено (с увеличением) в виде синусоиды. Длина звуковой волны, обозначенной греческой буквой λ , соответствует продолжительности цикла. (Источник: D. R. Griffin. *Echoes of bats and men*. Garden City, N.Y.: Anchor Books/Doubleday, p. 39)

на 1000 Гц, значит, за 1 с происходит 1000 циклов, или изменений, звукового давления (рис. 12.2). Считается, что молодые люди способны воспринимать звуки с частотой от 20 до 20 000 Гц; звуки, частота которых ниже 20 или выше 20 000 Гц, находятся ниже и выше порога слухового восприятия человека.

Частота и длина волны. Для описания звуковых волн используется также и такая характеристика, как длина одиночной волны. Как будет ясно из материала, изложенного в главе 14, это свойство весьма полезно для понимания многих аспектов такого феномена, как локализация звука. **Длина звуковой волны** – это линейное расстояние между двумя последовательными компрессиями (этот параметр обозначается греческой буквой – λ) (рис. 12.3).

Длина волны обратно пропорциональна частоте (т. е. $\lambda=v/f$). Так, в воздушной среде длины волн звуков, распространяющихся с постоянной скоростью 335 м/с и имеющих частоту 1100, 550 и 2200 Гц, равны 30,48; 60,96 и 15,24 см соответственно. Чем больше частота звука, тем чаще в течение определенного промежутка времени изменяется давление, тем ближе пики и подошвы звуковой волны примыкают друг к другу и тем короче сама волна. Так, низкочастотный звук имеет длинную волну, а высокочастотный – короткую (рис. 12.4). Из графика следует, что длина волны звука с частотой 1100 Гц равна 30,48 см.

Высота звука. **Частота** характеризует физическое свойство звука – число изменений звукового давления в секунду. Психологическим параметром аудиального стимула, непосредственно связанным с его частотой, является **абсолютная высота тона**, и звуки разной высоты вызывают у слушателей разные ощущения: они могут казаться высокими или низкими. Высота звука изменяется в очень широких пределах, и известны как очень низкие, басовые, звуки, так и исключительно вы-

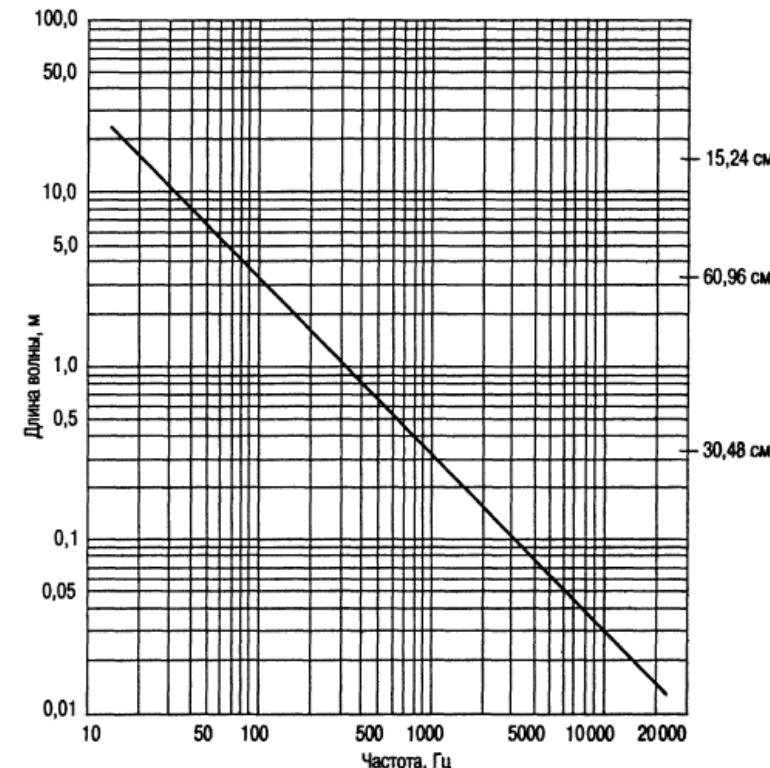


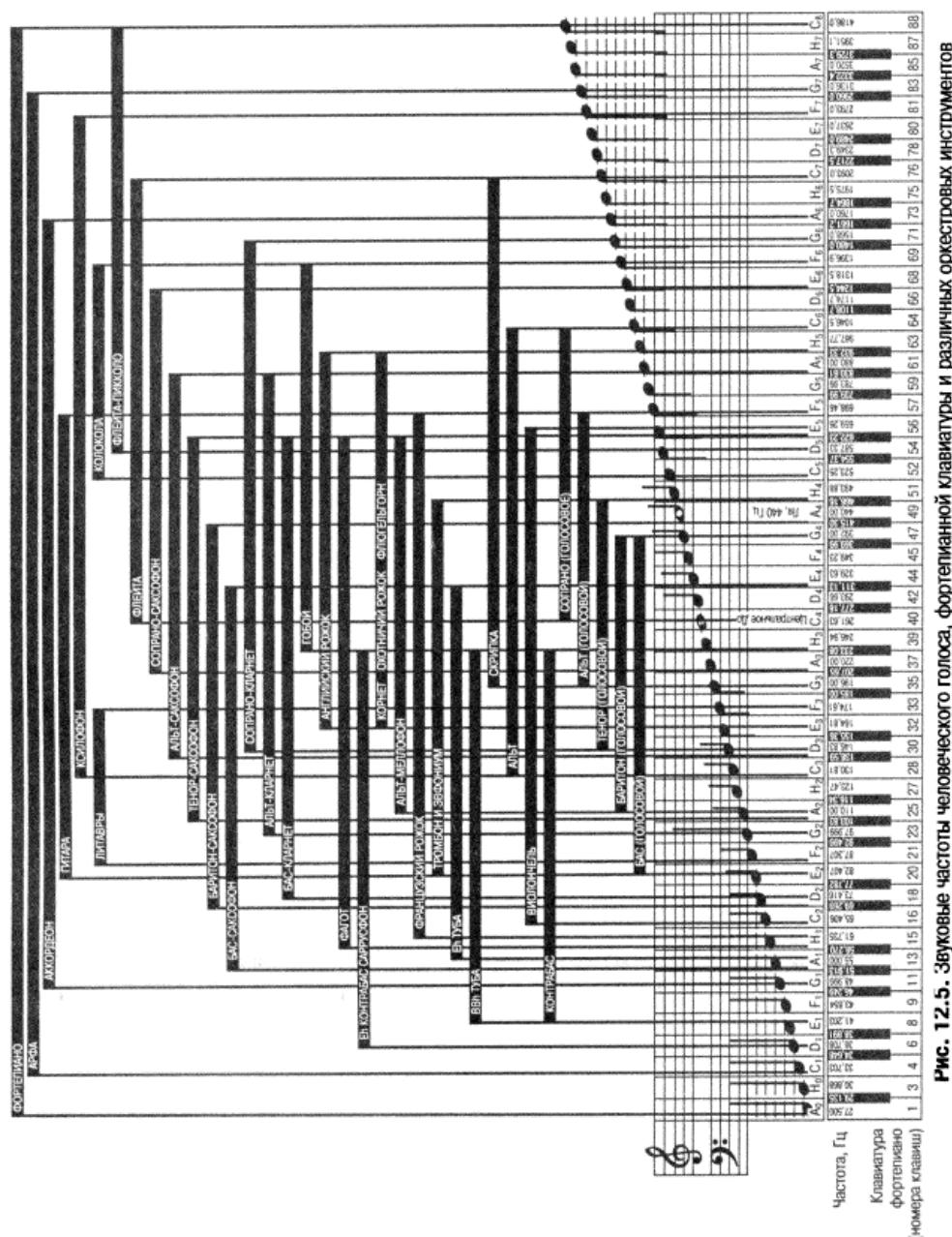
Рис. 12.4. Длина волны как функция частоты (среда – воздух, $T=15^{\circ}\text{C}$)

сокие, дискантовые. Сведения о частоте звуков некоторых известных музыкальных инструментов представлены на рис. 12.5.

Амплитуда

Звуки отличаются друг от друга не только по высоте, но и по **амплитуде** – количеству изменения звукового давления, т. е. степени смещения (компрессии или декомпрессии) относительно положения покоя (рис. 12.2). При низком давлении амплитуда звука мала и звук слабый, при высоком давлении воздуха амплитуда звука велика и слышен интенсивный звук. (Характеризующие звук термины **амплитуда** и **интенсивность** – взаимозаменяемые.)

Будучи физическим параметром, амплитуда, или интенсивность, звука зависит от давления или силы, действующих на его источник. Основной единицей измерения давления является **сила на единицу площади**. Несмотря на то что давление звука может быть выражено во многих других единицах, для удобства в **акустике** (разделе физики, занимающемся изучением упругих волн) давление измеряется в динах на квадратный сантиметр ($\text{дин}/\text{см}^2$). Иногда давление звука оценивается в эквивалентной единице – в микробарах, сокращенно мбар. Сравнительно недавно изменение давления стали выражать в ньютонах на квадратный метр, $\text{Н}/\text{м}^2$, и микропаскалях, мкПа.



Децибел (дБ). Интервал амплитуд, к которым чувствительно ухо, чрезвычайно широк. Сила самого громкого звука в миллиарды раз превышает интенсивность самого слабого звука, улавливаемого человеческим ухом. Поскольку этот интервал огромен, удобно пользоваться логарифмической шкалой давлений, названной в честь Александра Грэма Белла **децибелльной (дБ) шкалой**. Преимущество логарифмической шкалы децибелов для оценки интенсивности звука заключается в том, что она сокращает огромный интервал возможных значений амплитуд и пре-вращает все их значения, доступные человеку, в значительно более узкую и удобную для практического использования шкалу, изменяющуюся от 0 до приблизи-тельно 160.

Сила звука в децибелах равна

$$N_{\partial E} = 20 \log P^e / P^r$$

где: N_{dB} — число децибел, P^e — звуковое давление, которое нужно выразить в децибелях; P^r — эталонное давление, равное 0,0002 дин/см².

Звуковое давление, которое нужно выразить в децибелах (P^e), соотносится именно с таким эталонным давлением потому, что по своему абсолютному значению оно близко к среднему слуховому порогу человека (для звука с частотой 1000 Гц).

Децибелы — не такие абсолютные, фиксированные единицы, как граммы, метры или ватты. Выражая интенсивность звука в децибелях, мы показываем, во сколько раз он более интенсивен или менее интенсивен, чем звук, соответствующий эталонному звуковому давлению P^r . Децибелльная шкала, построенная относительно эталонного давления, равного $0,0002 \text{ дин}/\text{см}^2$ и принятого в качестве порогового значения, обычно называется *уровнем звукового давления (УЗД)*. Это название введено в обиход в связи с тем, что для практических целей при определении децибел нередко используются и другие эталонные давления.

В табл. 12.1 представлены децибелы, рассчитанные по вышеприведенной формуле для интервала давлений (P^e), создаваемых некоторыми знакомымян источниками звуков. Для наглядности отобраны такие значения давлений, которые отличаются друг от друга на порядки (например, давление, равное $200 \text{ дин}/\text{см}^2$, в десять раз больше давления, равного $20 \text{ дин}/\text{см}^2$, которое, в свою очередь, в 10 раз больше давления, равного $2 \text{ дин}/\text{см}^2$ и т. д.).

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что изменения звукового давления и децибелы связаны между собой не линейной, а скорее логарифмической зависимостью. Сравнение данных, приведенных в первых двух графах, показывает, что при *десятикратном увеличении* звукового давления (P^e) чи́фро децибел увеличивается на 20. Например, если интенсивность одного звука равна 80 дБ, а интенсивность второго – 60 дБ, то в первом случае звуковое давление в 10 раз выше, чем во втором (разница в силе звуков равна 20 дБ). Обратите внимание на то, что интенсивность шепота на 20 дБ превышает интенсивность звука, соответствующего слуховому порогу и имеющего интенсивность (в дБ), равную нулю. В данном случае тоже имеет место *десятикратное увеличение звукового давления*. Для сравнения: амплитуда звуковой волны, соответствующей обычному разговору, на 60 дБ больше, чем эталонный уровень, что соответствует *тысячекратному увеличению звукового давления*.

Таблица 12.1

Связь между звуковым давлением и децибелами (УЗД) для некоторых хорошо известных источников звуков

Давление, P_e , дин/см ²	дБ	Источник звука
2000	140	Реактивный самолет в момент взлета Может вызвать боль и стать причиной травмы
200	120	Раскат грома, сопровождаемый ударом молнии, рок-музыка передаваемая через усилитель
20	100	Интенсивный транспортный поток, шум метро, пневматическая дрель
2,0	80	Заводской шум, фен для сушки волос, пылесос
0,2	60	Обычный разговор
0,02	40	Офис, в котором занимаются канцелярской работой, или жилое помещение
0,002	20	Шепот, шелест листвьев
0,0002	0	Слуховой порог

Нелинейный характер зависимости между изменениями звукового давления и выражениями этих изменений в децибелах требует осторожности при интерпретации численных значений последних. Выше уже отмечалось, что увеличение звукового давления на порядок одновременно означает и его увеличение на 20 дБ. Кроме того, *двукратное* увеличение звукового давления приводит к его увеличению на 6 дБ. (Аналогично и уменьшение звукового давления вдвое уменьшает количество децибел на 6 единиц.) Это значит, что если амплитуда давления звука равна 20 дБ УЗД, то после двукратного увеличения давления повышения децибельного уровня вдвое *не произойдет*. Скорее всего, амплитуда изменится от 20 до 26 дБ. Аналогичным образом, при уменьшении вдвое звукового давления, соответствующего 40 дБ УЗД, мы получим звук, интенсивность которого равна 34 дБ УЗД.

Громкость — слуховое ощущение, или психологический параметр, определяемый величиной амплитуды. Звуковые волны с большими амплитудами, соответствующими большим изменениям звукового давления, воспринимаются как громкие звуки, а волны с небольшими амплитудами, соответствующие незначительным изменениям звукового давления, воспринимаются как звуки малой интенсивности. Амплитуда звуковой волны важнейший, но не единственный фактор, определяющий громкость звука. Ощущение громкости звука может зависеть также и от его частоты. Кроме того, между амплитудой и громкостью нет линейной зависимости. Как уже отмечалось выше, амплитуда звука, создающего звуковое давление, равное 26 дБ, в два раза больше амплитуды звука, создающего давление, равное 20 дБ; однако сказать, что первый звук в два раза громче второго, нельзя. В следующей главе этот вопрос будет рассмотрен более подробно.

Сложность

Большинство встречающихся в природе звуков невозможно представить простой синусоидальной волной, аналогичной той, что изображена на рис. 12.2. Звук, соответствующий по своим свойствам идеальной синусоиде с постоянной частотой и амплитудой, может быть получен лишь в лабораторных условиях. Большинство звуков, которые мы слышим в реальной жизни, — это сочетания акустических сигналов, каждый из которых может быть представлен своей собственной синусоидой, вследствие чего их общая, суммарная, синусоида отличается **сложностью**. Так, большинство окружающих нас звуков — голоса людей и животных, шум, доносящийся с улиц, забытых транспортными средствами, звуки музыкальных инструментов и т. п. — это результат взаимного наложения различных волн с различными частотами. Для подобных звуков характерны чрезвычайно сложные циклы изменения давления — циклы сжатия и разрежения (рис. 12.6).

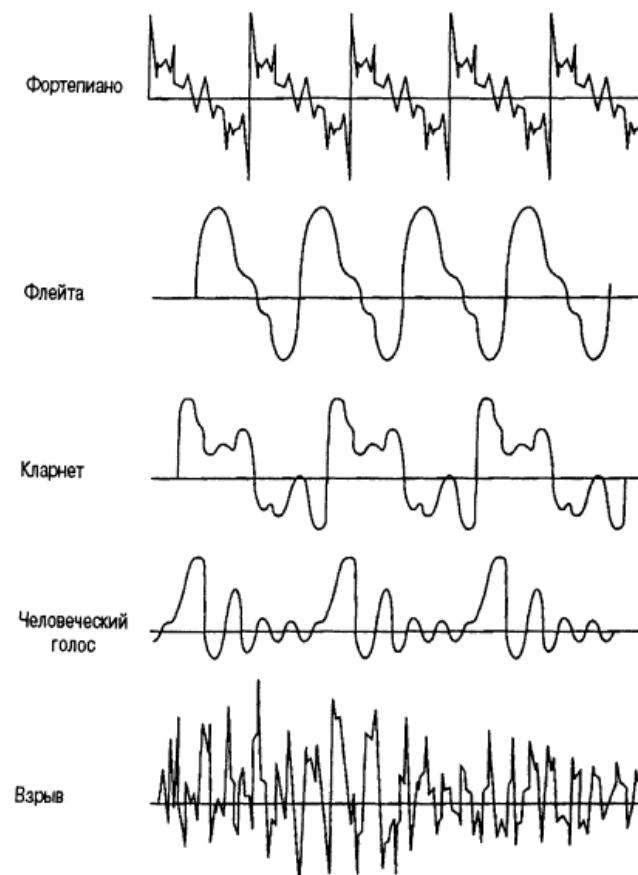


Рис. 12.6. Типичные звуковые волны, соответствующие некоторым звукам

Голос человека представлен волной, соответствующей звуку *a*, произносимому так, как он произносится в слове *father* (Источник: Kinser & Fray. *Sound wave of the human voice*, 1962)

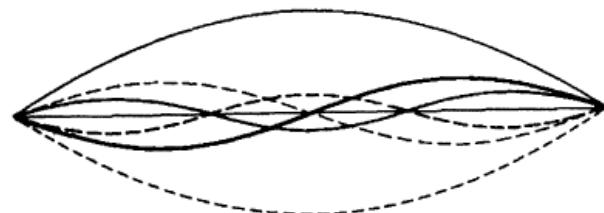


Рис. 12.7. Колебание струны музыкального инструмента

Одновременно с колебанием всей струны целиком, которое создает ее основной тон, возникают и так называемые гармоники, генерируемые отдельными участками струны – строго определенными долями ее общей длины. В данном примере речь идет о колебании участков струны, равных половине и одной трети струны

В сложных звуковых волнах, создаваемых музыкальными инструментами, проявляется важное свойство источников звуковых колебаний. Как правило, любой источник сложных звуковых колебаний одновременно создает звуковые волны с разными частотами. Самые низкие частоты, называемые **фундаментальной частотой** (или *первой гармоникой*), определяют *высоту* сложного звука. Задетая скрипичная или гитарная струна колеблется как единое целое, вызывая чередование сжатий и разрежений окружающего ее воздуха. Однако колебания создает не только вся струна целиком (что является источником фундаментальной частоты), одновременно звуковые волны генерируются и отдельными участками струны, представляющими собой строго определенные доли ее общей длины (рис. 12.7).

Эти дополнительные колебания с частотами, кратными фундаментальной частоте, называются **гармониками** (или *обертонами*). Иными словами, **фундаментальная частота** представляет собой *самую низкую* частоту сложной звуковой волны; все более высокие частоты, кратные частоте фундаментальной волны, представляют собой **гармоники** последней. Роль фундаментальной частоты и ее гармоник будет рассмотрена ниже, в разделе, посвященном патологии слуха.

Сложные волны и анализ Фурье. Несмотря на то что сложный звук не может быть представлен в виде одной синусоидальной волны, его можно представить **несколькими** синусоидами. Вспомните то, что было сказано про анализ Фурье в главе 6 при обсуждении анализа сложных визуальных сцен их разложением на простые синусоидальные волны. Аналогичным образом анализируются и звуковые волны. Не вдаваясь в детали, можно сказать, что, согласно теореме Фурье, любая сложная периодическая волна может быть представлена в виде суммы ряда простых синусоидальных волн, каждая из которых имеет свою собственную частоту и амплитуду. Разложение сложной волны любой формы на компоненты, имеющие синусоидальную форму, называется **анализом Фурье**. Синтез волни, имеющих сложные формы, из простых синусоидальных волн называется **синтезом Фурье**.

В качестве примера синтеза сложной волны рассмотрим рис. 12.8. Источником приблизительно такой квадратной волны, полный цикл которой представлен в правом нижнем углу рис. 12.8, являются некоторые сирены. Анализ этого звука, выполненный по методу Фурье, показал, что он образован пятью компонентами, представленными в левой колонке рис. 12.8. Правая колонка – сложные волны, образу-

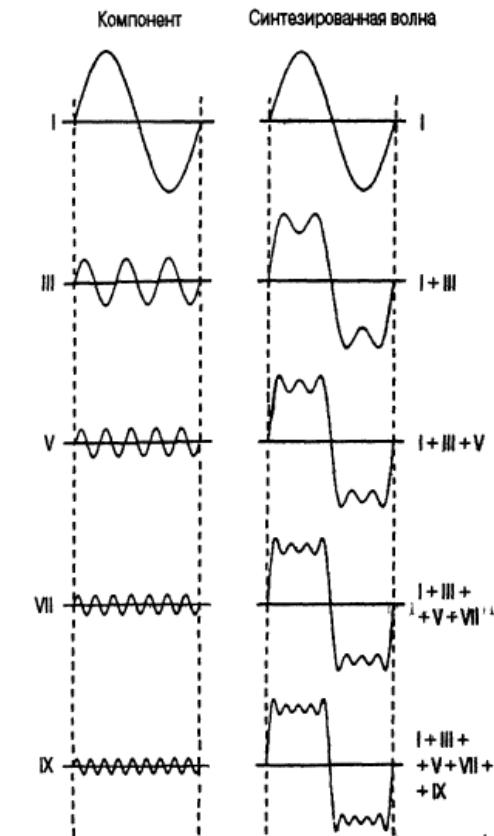


Рис. 12.8. Синтез сложной волны из простых волн

Относительные частоты каждого компонента обозначены цифрами I, III, V, VII и IX, проставленными слева от каждой кривой. Если бы складывалось большее количество гармоник, степень аппроксимации квадратной волны, представленной в правом нижнем углу рисунка, была бы выше.

(Источник: E. G. Boring, H. S. Langfeld & H. P. Weld. *Foundations of psychology*. New York: John Wiley, 1948, p. 316)

ющиеся в результате последовательного добавления компонентов (на каждом этапе добавляется по одной волне). Математически анализ Фурье начинается с **фундаментальной частоты** – самой низкой частоты из всех, представленных в сложной волне. Именно к ней добавляются синусоидальные волны, более высокие частоты которых кратны фундаментальной частоте.

Высота сложного тона определяется его фундаментальной частотой. Если испытуемому предъявить сложный звук, а затем попросить его подобрать простой звук, соответствующий ему по высоте, то он выберет звук, который можно представить простой синусоидой с частотой, примерно равной фундаментальной частоте сложного звука. Иными словами, высота сложного тона приблизительно равна высоте звука, который можно представить синусоидой с частотой, близкой к фундаментальной частоте сложного тона (Moore, 1994).

Акустический закон Ома. Аудиальная система может, правда лишь приблизительно, анализировать сложные волны по методу Фурье: она разлагает их на составляющие компоненты и направляет информацию о представленных в ней частотах на более высокие уровни аудиальной системы. Этот феномен, известный под названием **акустического закона Ома** (названного в честь немецкого физика Георга Ома (1787–1854), более известного своими работами в области электричества),

заключается в следующем: когда на нас воздействует относительно сложный звук, например когда мы слышим аккорд, образованный несколькими нотами, мы способны оценить вклад, внесенный в него отдельно каждой нотой. Иными словами, из закона Ома следует, что мы способны воспринимать индивидуальные частотные компоненты сложного звука.

Тембр. Психологическим аспектом восприятия звука, отражающим сложность звуковой волны, является **тембр** (от старофранцузского слова *tamber*, что значит «маленький колокольчик»). Тембр – это отличительное качество тона того или иного звука, являющееся результатом числа и интенсивности гармоник (или обертонов), которые производят этот звук. Например, сложный звук музыкального инструмента образован фундаментальной частотой и обертональными частотами, всегда кратными фундаментальной частоте и присутствующими в звуке в разных количествах. Количество и характер обертонов, создаваемых разными музыкальными инструментами, различны, вследствие чего различны и тембры. Именно благодаря тембру мы отличаем музыкальные инструменты друг от друга даже тогда, когда звучат одни и те же ноты одинаковой высоты. Различия в тембрах музыкальных инструментов – следствие различий их обертонов.

Подводя итог, можно сказать, что **высота** сложного звука зависит в первую очередь от его фундаментальной частоты, а **темпер** – от гармоник. Именно поэтому такие инструменты, как гитара и фортепиано, создающие много обертонов, обладают и более наполненным, богатым звуком, нежели инструменты, издающие относительно чистый, однородный звук (в частности, флейта).

Фаза

За один полный цикл звуковая волна проходит точку сжатия, точку покоя, при которой давление равно нулю, точку разрежения, затем снова точку покоя и наконец снова точку сжатия, иными словами, она перемещается от пика к пику (см. рис. 12.2). Та часть цикла, который звуковая волна проделала к данному моменту времени, называется **фазой**. Полный цикл может быть также охарактеризован и угловой мерой, называемой **фазовым углом**. Чтобы этой мерой было удобно пользоваться, за один полный цикл звуковой волны принят цикл, в котором начало (точка покоя) соответствует 0° , первый пик (первое сжатие) – 90° , точка покоя – 180° , разрежение – 270° и вторая точка покоя – 360° . Подобный подход позволяет выразить любую часть полного цикла звуковой волне в градусах от 0 до 360° .

Возникающие одновременно звуковые волны взаимодействуют друг с другом. Два звука одинаковой частоты, звучащие одновременно, могут быть представлены синусоидами, все точки которых абсолютно одинаковы; эти волны накладываются друг на друга, и образуется волна, амплитуда которой равна сумме амплитуд исходных волн. О таких волнах говорят, что они синфазны, т. е. «совпадают по фазе». Но если из двух звуковых волн, имеющих одинаковые частоты, одна возникла чуть раньше другой, им будут соответствовать разные синусоиды и они будут достигать разрежений и сжатий в разное время. Например, звуки одинаковой громкости, одновременно исходящие из двух громкоговорителей, не связанных между собой и расположенных на разном расстоянии от слушателя, могут разойтись по фазе. Иная ситуация, приводящая к несовпадению звуков по фазе, возникает тог-

да, когда звук от единственного громкоговорителя проходит разные расстояния, прежде чем достигает и правого, и левого уха слушателя: при этом звуки, воспринимаемые левым и правым ухом, тоже оказываются «не в фазе». Разница между фазами измеряется в градусах.

Некоторые примеры выраженных через фазовый угол несовпадений по фазе представлены на рис. 12.9 (разница в фазовых углах определена относительно волны A).

Если одна звуковая волна достигает точки сжатия на одну четверть цикла быстрее, чем другая (т. е. на $\frac{1}{4}$ от 360°), то говорят, что волны разошлись по фазе на 90° (рис. 12.9, волна B). Если одна волна опережает другую на полцикла, расходжение по фазе между этими волнами составляет 180° (рис. 12.9, волна C). При этом если их частоты и амплитуды соответственно равны между собой, волны оказываются диаметрально противоположное влияние на воздушную среду: когда одна волна достигает пика сжатия воздуха, вторая достигает пика его разрежения, в результате чего они нейтрализуют результаты воздействия друг друга и не будет слышен никакого звука. Про волну C, которая является зеркальным отражением волны A, можно сказать, что она «обратна» по фазе волне A.

Фаза и шумоподавление. Способность звуковых волн, расходящихся по фазе на 180° , нейтрализовать воздействие друг друга имеет большое практическое значение. Отмена, или нейтрализация, звукового давления с помощью звуковой волны той же амплитуды и частоты, но обратной по фазе может быть использована для «глушения» источников нежелательного шума (Alper, 1991). Этот метод, получивший название **метода шумоподавления** (в физике его называют **деструктивной интерференцией** или – иногда – **полной аннуляцией**). Он был разработан в 70-х гг. XIX в. английским физиком Джоном Уильямом Страттом).

Метод шумоподавления особенно полезен для борьбы с предсказуемым, продолжительным или системным шумом, являющимся результатом смешения таких

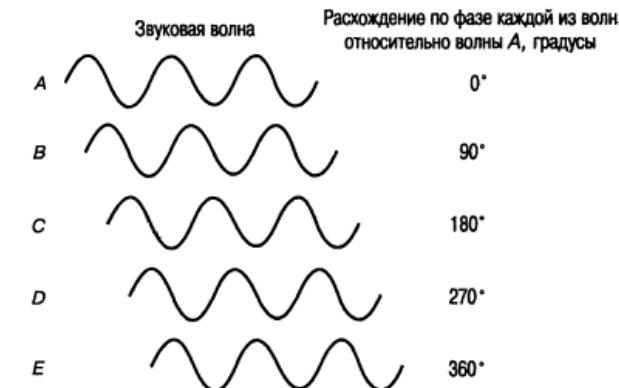


Рис. 12.9. Расхождение звуковых волн по фазе

Причиной расхождения по фазе двух волн является разница во времени достижения сжатия. В данном примере определяется расхождение по фазе с волной A. Так, пик сжатия волны B отстает от пика сжатия волны A на 90° , пик сжатия волны C отстает от пика сжатия волны A на 180° и т. д. (Источник: W. A. Van Bergeijk, J. R. Pierce & E. E. David. Waves and the ear. Garden City, N. Y.: Anchor/Doubleday, 1960, p. 85)

неприятных, раздражающих, а иногда и потенциально вредных звуков, как гул, рев, вибрация и вой, источниками которых служат промышленные установки кондиционирования воздуха, различное заводское оборудование и двигатели самолетов. В течение нескольких микросекунд микрофон «отбирает пробу» нежелательного шума, которая затем анализируется компьютером. То, что делает компьютер, по своей сути — анализ Фурье: он выявляет основные обертоны шума и его периодические компоненты. (На практике эта операция наиболее успешно выполняется с низкочастотным шумом.) Практически немедленно компьютер генерирует идентичную звуковую волну, имеющую ту же частоту и амплитуду, что и нежелательный шум, но являющуюся ее зеркальным отражением, т. е. обратную ей по фазе (или расходящуюся с ней по фазе на 180°). Результат одновременного распространения этих двух сложных волн — «антишум», или тишина. При этом исчезают многие раздражающие посторонние шумы, а такие звуки, физические характеристики которых нестабильны (например, человеческая речь), полностью сохраняются. На самом деле метод отмены шума «удваивает количество» последнего, но слышишь лишь очень небольшая его часть.

Резонанс

Большинство твердых объектов, если по ним ударить или привести их в движение, приложив необходимую для этого силу, вибрируют с определенной частотой. Стоит только ударить ложкой по краю стеклянного стакана, и он начнет колебаться с определенной частотой. Частота, с которой колеблется приведенный в движение объект, называется *естественной*, или *резонансной*, частотой данного объекта и зависит от массы и упругости объекта (см. ниже экспериментальное подтверждение). Вызывать колебания объектов с такой частотой, которая совпадает с частотой колебаний внешнего воздействия, т. е. заставить объекты резонировать, могут различные внешние гармонические воздействия, в том числе и звук. Резкое возрастание амплитуды колебаний объекта при воздействии на него источника звука, частота которого соответствует его собственной естественной, или резонансной, частоте, называется *резонансом*.

Общее правило, касающееся достижения резонансной вибрации объекта, таково: чем меньше разница между резонансной частотой объекта и частотой, действующей на него, тем легче она достигается. Наибольшие шансы вызвать резонансную вибрацию объекта имеет тот источник звука, частота которого равна естественной, или резонансной, частоте объекта. Не исключено, что вам самим приходилось наблюдать это явление: вибрацию оконного стекла в помещении, в котором стереосистема включена на полную мощность. Вибрацию стекла вызывают те звуки, испускаемые стереосистемой, которые имеют одинаковую с ним резонансную частоту. Причиной того, что, поднеся к уху раковину, мы слышим «шум прибоя», тоже является резонанс: воспринимаемый нами звук — результат совместного воздействия воздуха, который содержится в раковине и резонирует со свойственными ему частотами (представляющими собой сложную смесь преимущественно высоких частот), и внешних звуков. Под воздействием внешних звуков (т. е. звуков вне раковины), даже если они и очень слабы, содержащийся в раковине воздух начинает резонировать, в результате чего и возникает характерный звук морского прибоя.

Насколько важен резонанс, читатель поймет, когда мы приступим к обсуждению механизма восприятия звука: наружное ухо и наружный слуховой проход отбирают из звуковых волн и усиливают только те частоты, которые соответствуют их собственным резонансным частотам и способны заставить их резонировать.

Экспериментальное подтверждение

Изменение резонансной частоты

С помощью трех одинаковых стаканов вы сами легко можете продемонстрировать резонансные характеристики объектов. Для начала стукните ложкой по краю каждого из них, пока они еще пусты, и убедитесь в том, что все три стакана издают практически одинаковые звуки. Эти звуки соответствуют резонансной частоте молекул стекла, приведенных в движение ударом ложки.

Оставив один стакан пустым, заполните два других водой — один наполовину, а второй — на две трети и снова ударьте по ним ложкой. Теперь вы услышите разные звуки. Пустой стакан будет по-прежнему издавать звук, соответствующий его резонансной частоте, а при ударе ложкой по стаканам, заполненным водой, вы услышите более низкие звуки, потому что под влиянием воды частота колебаний молекул стекла становится ниже. Короче говоря, налив в стаканы некоторое количество воды, вы тем самым понизили их резонансные частоты, вследствие чего звук, который вы услышали, ударив по ним ложкой, и был воспринят вами как более низкий.

Анатомия органа слуха и механизмы звуковосприятия

Сейчас мы приступаем к обсуждению тех функций органов слуха, благодаря которым описанные выше сложные колебания давления воспринимаются нами как звуки. В первую очередь нас интересуют органы-рецепторы, воспринимающие звуковую энергию, и механизмы ее преобразования в нервные импульсы, а также функции органов-рецепторов. Хотя в природе существует огромное число структур, способных воспринимать акустическую энергию, основным объектом нашего внимания будет ухо человека (рис. 12.10). Как следует из рис. 12.11, аудиальная система может быть условно разделена на три основных структурных компонента: наружное ухо, среднее ухо и внутреннее ухо.

Наружное ухо

Наружное ухо большинства млекопитающих состоит из *ушной раковины*, *наружного слухового прохода* и *барабанной перепонки*.

Ушная раковина (латинское название — *pinna*, что значит «выступ, гребень») — исполняет несколько функций: защищает от механических повреждений чувствительные, легко травмируемые внутренние структуры, предотвращая попадание в слуховой проход инородных тел, и направляет в него улавливаемые ею колебания воздуха. Благодаря своей форме ушная раковина также усиливает высокочастотные звуки, частота которых колеблется в пределах 4000 Гц (Gulick, Gescheider & Frisina, 1989). Кроме того, ушная раковина играет некоторую роль и в тех случаях, когда, услышав звук, человек должен понять, где находится его источник, — впе-

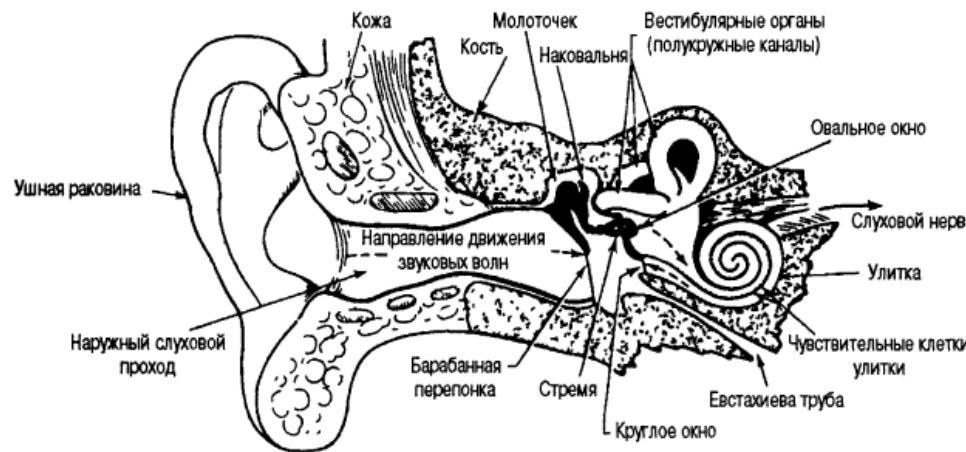


Рис. 12.10. Анатомическое строение человеческого уха (схема)

Колебания воздуха, пройдя через наружный слуховой проход, воздействуют на барабанную перепонку. Колебания барабанной перепонки передаются через среднее ухо цепью слуховых косточек, к которым принадлежат молоточек, наковальня и стремя. Основание стремени передает вибрацию дальше – жидкости, содержащейся в улитке внутреннего уха. Вестибулярные органы, расположенные непосредственно над улиткой, представляют собой совокупность сенсорных структур, управляющих поддержанием равновесия, изменениями положения тела в пространстве и детектированием гравитации

реди или позади него (см., например, Batteau, 1968, Freedman & Fisher, 1968). Ушная раковина также важна при определении удаленности от земли вертикально расположенных источников звука (Butler & Humanski, 1992; Hofman et al., 1998). К обсуждению роли ушной раковины в локализации звука мы вернемся в главе 14.

Хотя подавляющее большинство людей не имеют возможности управлять мускульной системой, контролирующей ушные раковины, многим млекопитающим это доступно. Всем приходилось наблюдать, как кошки или собаки, заслушав какой-нибудь звук, рефлекторно поворачивают свои подвижные ушные раковины в ту сторону, откуда он доносится. Конечно же, при этом способность ушной раковины улавливать колебания воздуха, а следовательно, и степень ее участия в локализации источников звуков возрастают. Однако ушные раковины есть не у всех млекопитающих. Такие морские животные, как дельфины и киты, лишены ушных раковин, возможно, потому, что сами их тела способны воспринимать возникающие в воде звуковые волны. Кроме того, выступающие ушные раковины, уменьшая обтекаемость тел, одновременно уменьшали бы скорость передвижения. Возможно, отсутствие ушных раковин у низших позвоночных – рыб, земноводных, рептилий и птиц – объясняется этой же причиной. Наружные слуховые проходы птиц прикрыты перьями, что может даже понизить остроту слуха, но это необходимо для уменьшения шума, создаваемого ветром во время полета (Marler & Hamilton, 1966).

Наружный слуховой проход – это полость, имеющая вид желобка с длиной и диаметром, равными примерно 2,5–3 см и 7 мм соответственно, и с открытым входным (наружным) и слепым выходным (внутренним) отверстиями. Основное на-

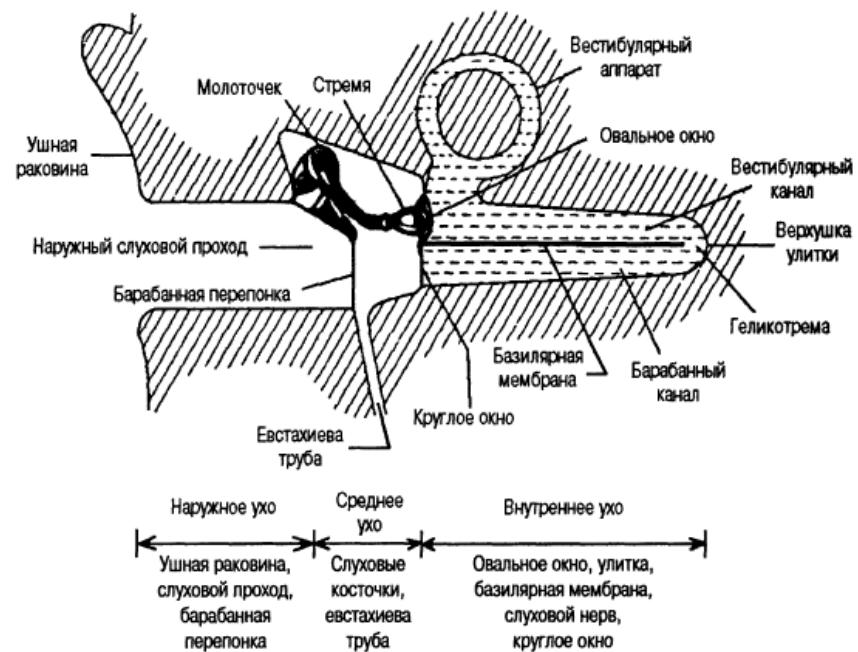


Рис. 12.11. Схема человеческого уха

На этом рисунке улитка (см. также рис. 12.12) представлена в развернутом виде. Когда основание стремени вдавливается внутрь, жидкость, содержащаяся в улитке, смещается в сторону геликотремы и выдавливает наружу мембрану круглого окна. (Источник: G. von Bekesy & W. A. Rosenblith. The mechanical properties of the ear. В книге S. S. Stevens (Ed.). *Handbook of experimental psychology*. New York: John Wiley, 1951, p. 1076)

значение наружного слухового прохода – улавливание звуковых колебаний и передача их барабанной перепонке, но он также защищает ее от инородных тел и поддерживает определенный температурный режим и влажность вблизи нее. Слуховой проход играет роль звукоприемника, и в первую очередь – частот, примерно равных 3000 Гц, усиливая вследствие резонанса чувствительность уха к таким звукам. Благодаря резонансной частоте слухового канала звуковое давление у барабанной перепонки повышается на 8–10 дБ, и ухо становится более чувствительным к звукам с частотой около 3000 Гц (Békésy & Rosenblit, 1951; Gulick et al., 1989). Резонансная частота наружного слухового прохода человека очень близка к частотам тех звуков, к которым наша аудиальная система наиболее чувствительна.

Барабанная перепонка – тонкая, полупрозрачная мембрана, которая отделяет наружный слуховой проход от среднего уха. Звуковое давление вызывает вибрацию барабанной перепонки, и именно на ней изменение звукового давления преобразуются в механическое движение. Смещения барабанной перепонки под воздействием звуковых волн, необходимые для восприятия звуков, соответствующих слуховому порогу, ничтожно малы. Для восприятия резонансных частот, достаточно такого смещения барабанной перепонки, которое меньше по величине, чем диаметр атома водорода (Békésy & Rosenblith, 1951).

Среднее ухо

Как показано на рис. 12.10 и 12.11, за барабанной перепонкой находится заполненная воздухом полость среднего уха. Среднее ухо трансформирует колебания барабанной перепонки в механическую энергию, которую и передает внутреннему уху. Непосредственно к барабанной перепонке примыкает **молоточек** (по-латыни — *malleus*) — первая косточка в цепи, состоящей из трех мелких косточек, которые называются **слуховыми косточками** и связывают среднее ухо с внутренним. Молоточек связан с **наковальней** (по-латыни — *incus*), которая, в свою очередь, связана со **стременем** (по-латыни — *stapes*), самой мелкой из всех слуховых косточек; основание стремени вставлено в **овальное окно**, которое, как следует из рис. 12.11, является входом во внутреннее ухо. Слуховые косточки, общая длина которых равна приблизительно 18 мм, прочно соединены связками и передают колебания барабанной перепонки овальному окну, действуя как система рычагов, причем основание стремени играет роль поршня.

Функции среднего уха: выравнивание импедансов. Полости наружного и среднего уха заполнены воздухом, а внутреннее ухо — водянистой жидкостью. Это различие имеет важное значение для передачи звуков во внутреннее ухо. Воздух представляет собой легко сжимаемую среду, а вода в силу своей большей плотности сжимается труднее, а это значит, что передача звуков в водной среде требует более значительных усилий, чем их передача в воздухе. Разница в сопротивлении (или в импедансах), существующая между такими средами, как воздух и вода, обнаруживается очень легко: достаточно сравнить не требующее практически никаких усилий движение собственного кулака в воздухе и усилие, с которым он преодолевает сопротивление воды. Сопротивление, оказываемое средой при прохождении через нее звуковых волн, называется **импедансом**, а разница между сопротивлением звуковым волнам, имеющим место в разных средах, называется **разностью импедансов**. Переход звуковой волны из одной среды в другую — из заполненной воздухом полости среднего уха в камеры улитки внутреннего уха, заполненные жидкостью, — приводит к возникновению разности импедансов, осложняющей процесс передачи звука специфическими механическими проблемами. Если колебания воздуха не будут трансформированы и каким-то образом сконцентрированы, они не смогут преодолеть сопротивления водянистой жидкости, содержащейся во внутреннем ухе, и аудиальная система утратит значительную часть своей чувствительности.

Основное назначение среднего уха — преобразование импеданса воздушной среды наружного уха в импеданс жидкой среды внутреннего уха и обеспечение эффективной трансмиссии звуковых колебаний из первого во второе. Для повышения эффективности передачи звука во внутреннее ухо структурные элементы среднего уха выполняют два важных механических преобразования. Хотя передача колебаний от барабанной перепонки стремени к овальному окну усиливается слуховыми косточками, играющими роль некоего рычага, лишь незначительно, это усиление очень важно. Несмотря на то что слуховые косточки представлены на рис. 12.10 и 12.11 лишь схематично, их действия способствуют более эффективным механическим движениям стремени, усиливая тем самым колебания и на нем, и на овальном окне приблизительно в 1,3 раза.

Однако большее значение для трансформации колебаний имеет прежде всего разница между эффективными поверхностями барабанной перепонки и основания стремени. Площадь барабанной перепонки, равная приблизительно 70 мм^2 , значительно превосходит площадь подножки связанного с овальным окном стремени, которая равна приблизительно 3 мм^2 . Концентрация колебаний сравнительно большой барабанной перепонки на заметно уступающем ей по площади стремени существенно увеличивает давление. (Более конкретно — давление на единицу поверхности.) Если равные по величине усилия воздействует на большую и меньшую поверхности, изменение давления будет больше во втором случае. (Точно так же удар молотка оставит на вашем столе лишь незначительный след, а удар такой же силы по маленькой шляпке гвоздя вгонит гвоздь в стол.) Разница в величине эффективных поверхностей двух структур приводит к тому, что на основании стремени и на овальном окне давление приблизительно в 20–25 раз больше, чем на барабанной перепонке. Этим успешно компенсируется разность импедансов, возникающая в связи с возрастанием плотности среды внутреннего уха. Именно поэтому среднее ухо называют также **органом, предназначенным для выравнивания импедансов** (Moore, 1989).

Итак, среднее ухо играет роль механического преобразователя, назначение которого заключается прежде всего в обеспечении продвижения звуковой волны через жидкость, содержащуюся во внутреннем ухе. Слух людей с дисфункцией среднего уха, вызванной патологией слуховых косточек, может быть значительно понижен. Напротив, многие биологические виды, которые обитают в воде и которым в обычных условиях не приходится воспринимать звуки из воздуха, не испытывают потребности в механической трансформации, аналогичной той, которая происходит в среднем ухе. Именно поэтому у многих видов рыб нет органов, аналогичных наружному или среднему уху (Fay, 1970). Слуховые косточки млекопитающих возникли в результате эволюции среднего уха земноводных и рептилий, которое, в свою очередь, — результат эволюции челюстных костей их эволюционных предшественников. Следовательно, возникновение такого чувствительного органа, как среднее ухо живущих на суше млекопитающих, благодаря которому внутреннее ухо, заполненное плотной жидкостью, способно воспринимать аудиальную стимуляцию, зародившуюся в воздухе, — результат эволюционного развития биологических видов, изначально приспособленных только к жизни в воде.

Акустический рефлекс. Среднее ухо не только играет роль приспособления для выравнивания импедансов, механически преобразующего звуковой сигнал, но и выполняет защитную функцию. К слуховым косточкам прикреплены две мышцы, предохраняющие их от чрезмерных колебаний при сильном звуке: **мышца, напрягающая барабанную перепонку** (по-латыни — *musculus tensor timpani*), связана с молоточком вблизи барабанной перепонки, а **стремянная мышца** (по-латыни — *musculus stapedius*) — со стременем. При воздействии громких звуков, которые могут травмировать миниатюрные структуры внутреннего уха (в первую очередь речь идет о звуках с частотой ниже 100 Гц), мышцы рефлекторно сжимаются и уменьшают поток вибраций, проходящий через среднее ухо. Совместное действие этих мышц, направленное на снижение чувствительности среднего уха к интенсивным звукам, называется **акустическим рефлексом**.

С точки зрения адаптивности (сенсорных систем) акустический рефлекс аналогичен сужению зрачка в ответ на слишком яркую вспышку, способную причинить глазу вред (вспомните рефлекс Витта, описанный в главе 3). Эта аналогия еще более подчеркивается тем, что аналогично несколько запаздывающей реакции зрачка на мгновенную, неожиданную вспышку яркого света (например, на фотовспышку) акустический рефлекс проявляется не мгновенно. Время, необходимое для его приведения в действие, слишком велико, чтобы он мог защитить от таких однократных, внезапных и резких звуков, как те, что производят выстрелы, петарды или даже удары молотка. Однако он является эффективным средством защиты от постепенно нарастающих, громких и относительно низкочастотных звуков. Интересно отметить, что, акустический рефлекс вводится в действие непосредственно перед вокализацией. Благодаря этому он особенно полезен в тех ситуациях, когда речь идет о таких громких звуках средней частоты, генерируемых самим человеком, как громкий крик. (Громкий плач детей по тому или иному поводу — хороший пример самогенерируемых звуков, нуждающихся в ослаблении.) Разумеется, внезапные громкие звуки, как и внезапный яркий свет, чрезвычайно редки в природе, поэтому нет ничего удивительного в том, что механизмы адаптации к ним недостаточно эффективны. Однако в ситуациях, связанных с воздействием громкого шума, акустический рефлекс может оказаться полезен. Если вам нужно поработать молотком, начните стучать с максимально допустимой громкостью. Это «запустит» акустический рефлекс и таким образом частично перекроет доступ извне некоторым другим громким звукам.

Евстахиева труба. Как сказано выше, среднее ухо не только повышает эффективность входящих звуковых волн, но и с помощью акустического рефлекса защищает легко травмируемые структуры внутреннего уха от слишком громких звуков. Однако защитные функции среднего уха этим рефлексом не исчерпываются: защитную функцию исполняет также один из структурных элементов среднего уха. Хотя полость среднего уха имеет слепой конец, защищающий ее от непосредственного воздействия перепадов атмосферного давления, она связана с глоткой узким проходом длиной примерно 35–40 мм, называемым евстахиевой трубой (названной так в честь Бартоломео Евстахия, итальянского анатома XVI в., впервые описавшего и саму трубу, и ее функции). Благодаря евстахиевой трубе давление воздуха в среднем ухе равно наружному давлению. Следовательно, когда открыт рот, давление воздуха по обе стороны барабанной перепонки одинаково.

Мы ощущаем влияние небольшого перепада давлений тогда, когда у нас мерзнет голова: евстахиева труба спадает, вследствие чего давление в среднем ухе перестает уравниваться с наружным давлением. Результатом этого небольшого перепада давлений является временное и обычно раздражающее снижение слуха. Существенная разница в давлении по обе стороны барабанной перепонки чревата ее аномальными и даже болезненными смещениями. При воздействии очень громких звуков или при резких перепадах давления (например, при внезапной потере высоты самолетом) может произойти разрыв барабанной перепонки.

Костная передача звука. Обычно звук попадает в чувствительное внутреннее ухо, пройдя последовательно наружное и среднее ухо. Альтернативный путь звука

во внутреннее ухо — **костная передача звука**, процесс, в результате которого звуковая волна непосредственно попадает во внутреннее ухо, минуя барабанную перепонку, слуховые косточки и прочие структуры среднего уха. При этом звуки вызывают колебание костей черепа, непосредственно стимулирующих внутреннее ухо. Однако костная передача звука значительно менее эффективна, чем воздушно-жидкостная передача звуков, реализуемая в среднем ухе, поскольку кости способны передавать лишь низкие частоты.

Костная передача звука — не такое редкое явление, как можно было бы подумать. Вы сталкиваетесь с ним (с передачей колебаний костями черепа), когда грызете что-нибудь твердое, например морковь или сухарь. Звук бора, которым врач сверлит ваш зуб, вы тоже слышите в основном благодаря костной передаче звуков: вибрация бора передается сначала зубу, затем черепу и наконец достигает внутреннего уха.

Экспериментальное подтверждение

Костная передача звука

Доказать существование костной проводимости очень легко. Заткните уши «берушами» или кончиками пальцев (делать это нужно осторожно, чтобы не повредить барабанную перепонку) и начните разговаривать или жевать. Звуки, которые вы при этом слышите, — преимущественно низкочастотные звуки, дошедшие до внутреннего уха благодаря костной проводимости, минуя все структуры как наружного, так и среднего уха. Колебания воздуха, возникающие в полости рта, через вибрацию щек передаются нижней челюсти и в конце концов достигают внутреннего уха.

Способность костей черепа проводить звук объясняет, почему самому человеку его голос, записанный на магнитофонную пленку, при воспроизведении записи кажется чужим, в то время как другие его легко узнают. Дело в том, что магнитофонная запись воспроизводит ваш голос не полностью. Обычно, разговаривая, вы слышите не только те звуки, которые слышат ваши собеседники (т. е. те звуки, которые воспринимаются благодаря воздушно-жидкостной проводимости), но и те низкочастотные звуки, проводником которых являются кости вашего черепа. Однако слушая магнитофонную запись собственного голоса, вы слышите только то, что можно было записать, — звуки, проводником которых является воздух.

Внутреннее ухо

Следующая стадия процесса передачи звукового давления — перемещение звуковой волны во *внутреннем ухе*, а именно движение стремени в водянистой жидкости внутреннего уха. Внутреннее ухо — небольшая (длиной 25–30 мм) трубчатая структура, представляющая собой спираль, образованную тремя прымывающими друг к другу витками, которая благодаря своей форме получила название **улитка** (по-латыни — *cochlea*). (На рис. 12.12 схематически представлены «развернутая» улитка и расположение ее основных структурных элементов.)

Улитка образована тремя полостями, или каналами. Центральный канал улитки называется **улитковым**, или **кохлеарным**, каналом; он проходит почти по всей

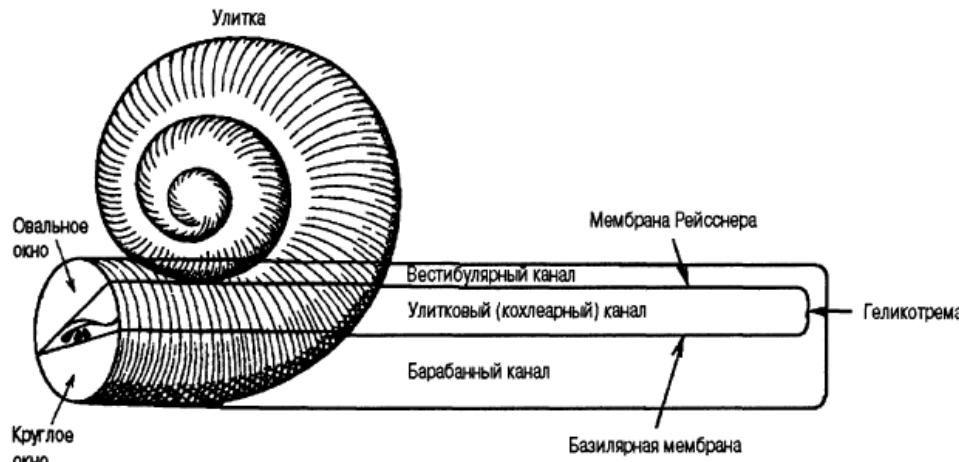


Рис. 12.12. «Развернутая» улитка (схематическое изображение)

ее длине и делит ее на два канала. Верхний канал, называемый **вестибулярным каналом** и начинающийся у овального окна, связан с нижним каналом, который называется **барабанным каналом**. Объединяет верхний и нижний каналы небольшое отверстие, расположенное в верхушке улитки и называемое **геликотремой**. Закрытое мембраной отверстие в основании барабанного канала называется **круглым окном** (см. рис. 12.10 и 12.11). Мембрана круглого окна расширяется, когда вследствие контакта стремечка с овальным окном происходит смещение жидкости. Вестибулярный и барабанный каналы заполнены жидкостью. Улитковый канал тоже заполнен жидкостью, но он никак не связан с двумя другими каналами.

Улитковый канал ограничен двумя мембранными: от вестибулярного канала — **мембраной Рейсснера**, а от барабанного канала — **базилярной мемброй**. Базилярная мембра упруга и эластична, и ее смещение зависит от частоты воспринимаемого звука (Narayan et al., 1998). В то время как сама улитка сужается к верхушке, базилярная мембра становится все шире и шире (рис. 12.13).

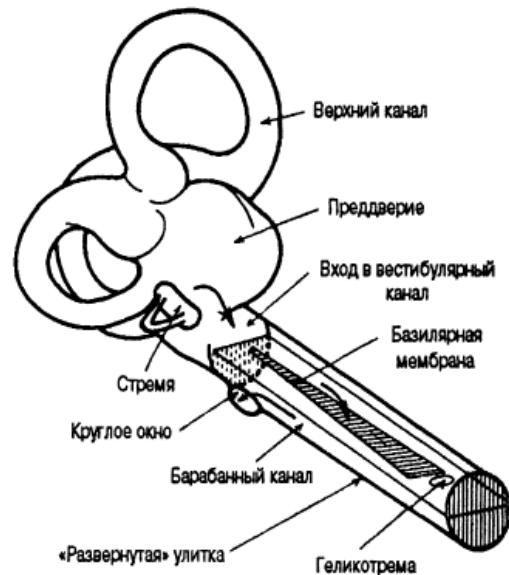
У основания, возле стремени, ширина базилярной мембраны менее 0,10 мм; по мере приближения к верхушке базилярная мембра расширяется, и вблизи геликотремы ее ширина уже равна 0,5 мм. Кроме того, у основания улитки базилярная мембра значительно (примерно в 100 раз) менее эластична, чем у ее верхушки. Как станет ясно в дальнейшем, функция базилярной мембраны особенно важна для понимания механизма восприятия звука, поскольку именно на ней располагаются рецепторы слуха — **волосковые клетки**.

Кортиев орган. В центральном улитковом канале находятся специализированные сенсорные структуры, нервы и опорные ткани, преобразующие звуковые колебания в нервные импульсы. Общее название этой рецепторной структуры — **кортиев орган** (по имени итальянского анатома Альфонсо Корти, который первым описал его в 1851 г.). Структурные элементы кортиева органа, расположенного на базилярной мембране вдоль всей ее длины, представлены на рис. 12.14, на котором изображена улитка в разрезе.

Рис. 12.13. Схематическое изображение внутреннего уха с «развернутой» улиткой

По мере приближения к геликотреме ширина базилярной мембраны увеличивается. Верхний канал и преддверие — компоненты вестибулярных органов, представленных на рис. 12.10. (Источник: G. von Bekesy.

Experimental models of the cochlea with and without nerve supply. В кн.: G. L. Rasmussen & W. F. Windle (Eds.). *Neural mechanisms of the auditory and vestibular systems*. Springfield, III.: Charles C. Thomas, 1960. См. также G. von Bekesy. *Sensory inhibition*. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1967, p. 137)



В состав кортиева органа входят колонки специализированных **волосковых клеток**, объединенных в две группы, отделенные друг от друга кортиевым тоннелем. Клетки одной группы называются **внутренними волосковыми клетками** (их число равно приблизительно 3500), клетки другой группы — **наружными волосковыми клетками** (их число равно приблизительно 20 000); каждая клетка имеет до 100 тончайших, чувствительных нитевидных щетинок, называемых **стереоресничками**, или просто **ресничками**. Внутренние волосковые клетки образуют одну колонку, а наружные волосковые клетки — три колонки. От внутренних и наружных волосковых клеток отходит около 50 000 слуховых нервных волокон. Однако количество волокон, связанных с внутренними и наружными клетками, не равно и не пропорционально числу самих клеток. Приблизительно 90–95 % нервных волокон принаследуют относительно распыленным внутренним волосковым клеткам, а остальные 5–10 % — более многочисленным наружным волосковым клеткам.

Эти существенные различия в нейронной структуре внутренних и наружных волосковых клеток наталкивают на мысль о том, что они, скорее всего, передают различные виды аудиальной информации. Так, на основании того, что внутренние волосковые клетки имеют значительно большее число нейронных связей, было высказано предположение, что они кодируют информацию о частоте звуков, а соответствующие им наружные волосковые клетки усиливают смещение базилярной мембраны, благодаря чему реакция внутренних клеток на частоту звука становится более обостренной (Dallos, 1992; Narayan et al., 1998; Nobili et al., 1998; Pickles, 1988; Scharf & Buus, 1986). Есть также и свидетельства в пользу того, что наружные волосковые клетки реагируют на низкоамплитудные, слабые звуки и играют важную роль в обнаружении звуков, интенсивность которых близка к абсолютному порогу (Nobili et al., 1998; Prosen et al., 1981).

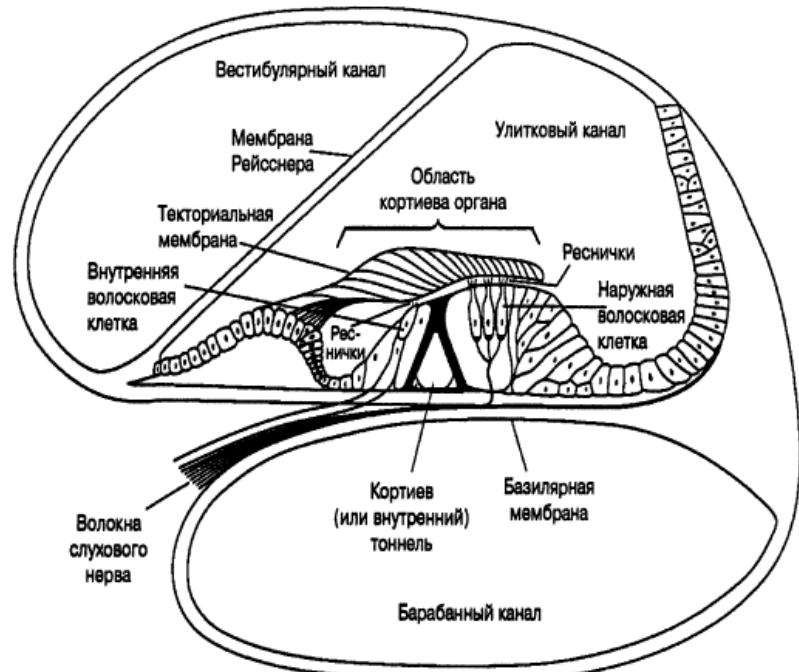


Рис. 12.14. Каналы улитки (в разрезе)

Улитковый канал отделен от вестибулярного канала мембраной Рейснера, а от барабанного канала – базилярной мемброй. В улитковом канале находится кортиев орган, состоящий из внутренних и наружных волосковых клеток, связанных с ними ресничек и волокон слухового нерва. Непосредственно над кортиевым органом располагается текториальная мембрана, с которой при смещении базилярной мемброй приходят в соприкосновение тончайшие реснички волосковых клеток.

Наружные волосковые клетки могут также способствовать тому, что ухо – спонтанно или в ответ на аудиальную стимуляцию – само начинает генерировать звуки: при всей кажущейся необычности этого феномена его существование доказано. Генерируемые ухом звуки называются *отоакустическими эмиссиями* (от греческого слова *otos*, что значит «ухо»). Хотя мы сами совершенно не замечаем этих звуков, их можно записать с помощью миниатюрного микрофона, введенного в наружный слуховой проход (Кемп, 1978, 1979). Как правило, отоакустические эмиссии имеют низкую амплитуду (в пределах 20 дБ) и частоту от 1000 до 2000 Гц. В пользу того, что в их возникновении активно участвуют наружные волосковые клетки, свидетельствует следующий факт: такие лекарственные препараты, как аспирин в больших дозах и хининсульфат, понижающие активность наружных волосковых клеток, одновременно подавляют и отоакустические эмиссии (McFadden & Pasanen, 1994). Интересно, что аудиальная стимуляция одного уха может вызвать отоакустическую эмиссию во втором, нестимулируемом ухе (Harrison & Burns, 1993).

Какую бы конкретную функцию ни исполняли эти чувствительные волосковые клетки, именно благодаря им проходит последняя стадия преобразования механи-

ческих колебаний в нервные импульсы. Как показано на рис. 12.14, более длинные реснички наружных волосковых клеток соприкасаются с **текториальной мембраной**, нависающей над ними (наряду с базилярной текториальной мембраной иногда причисляют к вспомогательным компонентам кортиева органа). Только один конец текториальной мембраны зафиксирован, и ее часть простирается вдоль всей длины улиткового канала. При соприкосновении стремени с овальным окном внутри улитки возникают колебания, приводящие в движение базилярную мембрану. Движение базилярной мембраны, в свою очередь, наклоняют реснички волосковых клеток в сторону текториальной мембраны. Эта стимуляция ресничек вызывает изменение электрического потенциала в волосковых клетках, и начинается первая стадия процесса нейронной трансмиссии. Именно на этой стадии механическая энергия в виде колебательных движений преобразуется в нервные импульсы.

Слуховой нерв

Нервные волокна, примыкающие к волосковым клеткам и пронизывающие базилярную мембрану по всей длине, объединяясь, образуют слуховой нерв. Отдельные волокна, образующие слуховой нерв, объединяются таким образом, что волокна, отходящие от соседних участков базилярной мембраны, приходят в соседние точки слуховой коры головного мозга. Подобная организация имеет функциональное значение. Верхушка базилярной мембраны вблизи геликотремы преобразует в нервные импульсы преимущественно низкочастотные сигналы; по мере возрастания частоты сигналов зона их обработки смещается все дальше и дальше к основанию базилярной мембраны, в сторону стремени (рис. 12.15). Иными словами, организация базилярной мембраны и ее «зоны ответственности» – **частотно специфичны**.

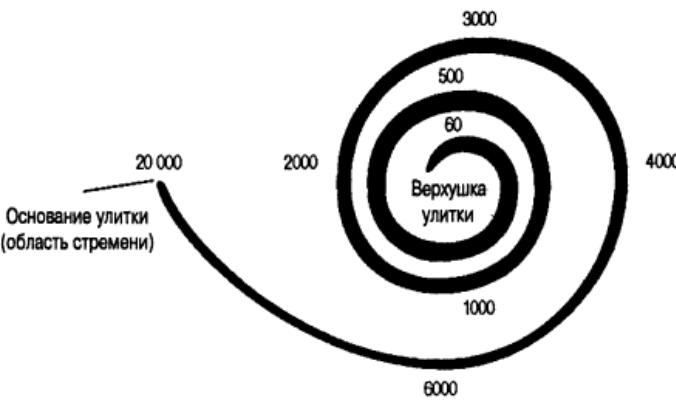


Рис. 12.15. Частотно специфичные участки базилярной мембраны (схема)

Из этой схемы следует, что максимальная активность участков мембраны по отношению к аудиальным сигналам зависит от частоты последних. Хотя участки базилярной мембраны отмечены лишь приблизительно и приведены примерные значения частот, важно следующее: максимальная активность разных участков базилярной мембраны разная и зависит от частоты звука, а именно: верхушка улитки, где базилярная мембрана широка, максимально активна по отношению к низкочастотным звукам, а основание улитки, где базилярная мембрана узка, наиболее активно обрабатывает высокочастотные сигналы.

Подобная пространственно упорядоченная организация нейронных элементов, соответствующая дифференциальному подходу к обработке сигналов разных частот, называется **тонотопической организацией**. Функционально тонотопическая организация обеспечивает системную обработку информации об аналогичных частотах, представленной в прилегающих друг к другу нейронных структурах. Это значит, что определенная зона слуховой коры избирательно реагирует на определенные частоты. Специфичность реакции на частоту стимула присуща всем уровням аудиальной системы. Мы вернемся к обсуждению тонотопической организации базилярной мембранны в следующем подразделе.

Измерение активности слухового нерва. Результаты измерения электрической активности отдельных волокон слухового нерва при воздействии на него различных звуков свидетельствуют о том, что некая форма специфичности реакции присуща и образующим его волокнам. Хотя многие из них реагируют на звуки, имеющие разные характеристики, преобладают волокна, избирательно реагирующие на определенные частоты; их иногда называют **волокнами, настроенными на определенную частоту**, чем подчеркивают их максимальную чувствительность к очень узкому интервалу частот. Как следует из **кривых частотной настройки**, представленных на рис. 12.16, каждому настроенному на определенную частоту нервному волокну соответствует некая частота, чувствительность к которой у него максимальна, т. е. такая звуковая волна, интенсивность которой, необходимая для

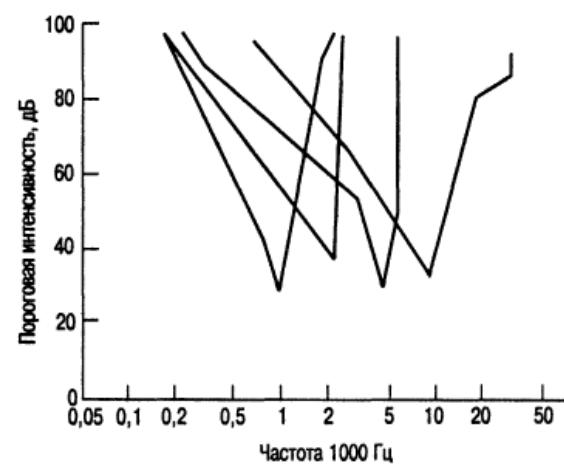


Рис. 12.16. Кривые частотной настройки четырех разных волокон слухового нерва

Реакция данного волокна зависит от частоты стимула. Каждая кривая — результат выявления самой низкой интенсивности тона определенной частоты, необходимой для того, чтобы стимул был замечен (т. е. для того, чтобы вызвать поровую реакцию). Частота тона, при которой абсолютный порог данного волокна минимальен, называется **характеристической, или наилучшей, частотой**. Например, второе волокно достигает порога при стимуляции своей наилучшей частотой, равной примерно 2000 Гц, или 38 дБ. Обратите внимание на то, что при воздействии на нервное волокно стимула, частота которого выше или ниже его характеристической частоты, порог данного волокна возрастает. Обращаем ваше внимание также и на то, что абсцисса — логарифмическая шкала. (Источник: Katsuki, 1961; Katsuki et al., 1959)

достижения нервным волокном его абсолютного порога, минимальна. Эта частота называется **наилучшей, или характеристической, частотой**.

Следовательно, при увеличении или уменьшении частоты стимула по сравнению с **наилучшей** чувствительность волокна уменьшается и возрастает его абсолютный порог. Результаты подобных экспериментов свидетельствуют о том, что слуховой нерв образован волокнами, которые избирательно и точно настроены на все потенциально слышимые частоты.

Теперь мы переходим к рассмотрению вопроса о том, как внутреннее ухо реагирует на разные частоты и обрабатывает содержащуюся в них информацию.

Функции внутреннего уха

Как правило, колебания, являющиеся источником воспринимаемых нами звуков, передаются от барабанной перепонки слуховым косточкам среднего уха, овальному окну и далее — улитке. Однако решающую роль в активации волосковых клеток и связанных с ними нервных волокон кортиева органа играет деформация центрального улиткового канала, и степень этой активации может быть разной. Следовательно, чтобы понять механизм возникновения слуховых ощущений, нам нужно в первую очередь разобраться в том, как базилярная мембра и кортиев орган обрабатывают входящую аудиальную информацию.

Известны две основные теории слуха (правильнее было бы назвать их **механизмами**), объясняющие, каким образом сенсорные структуры уха так обрабатывают информацию о частоте звуков, что у нас появляется возможность воспринимать абсолютную высоту тона. Хотя известны различные варианты обеих теорий, обычно их для удобства называют **теорией места и временной теорией**.

Теория места

Создатели **теории места** исходили из строго **тонотопической** организации волосковых клеток кортиева органа. Это значит, что каждой стимульной частоте соответствует свое строго определенное место на базилярной мембране (см. рис. 12.15). Следовательно, в зависимости от их частоты колебания жидкости, содержащейся в улитке, вызывают смещения разных участков базилярной мембраны. Эти разные участки, в свою очередь, стимулируют связанные с ними волосковые клетки и соответствующие последним нервные слуховые волокна. Более конкретно эту мысль можно выразить следующим образом: волосковые клетки, расположенные у основания базилярной мембраны, отличаются повышенной чувствительностью к высокочастотным звукам, а волосковые клетки вблизи верхушки улитки или геликофремы, напротив, более активно реагируют на стимуляцию низкими частотами. Кроме того, как уже отмечалось выше, организация по тонотопическому принципу свойственна всем уровням аудиальной системы — от нервных волокон, исходящих от базилярной мембраны, до слуховой коры головного мозга. А это значит, что нервные волокна, связывающие базилярную мембрану со слуховой корой, переносят информацию о тех же самых определенных частотах, что и участок мембранны, который они иннервируют. Следовательно, теория места описывает простран-

ственний код частоты. Таким образом, основой этой теории является представление о том, что разные частоты возбуждают разные участки базилярной мембранны (а также непосредственно связанные с этими участками волосковые клетки и принадлежащие им волокна слухового нерва и нейронные структуры аудиальной коры), благодаря чему мы и слышим звуки разной абсолютной высоты.

Ранняя версия теории места принадлежит Германну фон Гельмгольцу, который сформулировал ее в 1863 г., высказав предположение о пространственном распределении частот в улитке (т. е. о том, что резонансные свойства ее разных участков различны). Однако основным современным приверженцем теории места следует признать Георга (Дьердя) фон Бекеши (1899–1972), открывшего физический механизм возбуждения во внутреннем ухе и ставшего первым физиком – лауреатом Нобелевской премии в области физиологии и медицины (1961). Бекеши изучил процессы, протекающие во внутреннем ухе, и получил экспериментальные доказательства справедливости теории места.

Перемещение бегущей волны в улитке. Вклад, который Бекеши внес в понимание процессов, происходящих во внутреннем ухе, во многом определяется его исследованиями в области гидродинамики внутреннего уха и изучением уникального влияния частоты звука на смещение базилярной мембранны.

Когда под воздействием стремени начинает вибрировать овальное окно, его колебания передаются базилярной мемbrane, на которой располагаются рецепторы слуха – волосковые клетки. В результате вдоль базилярной мембранны возникает определенный *паттерн* вибраций, соответствующий уникальному виду волнового движения – **бегущей волне**. Бегущая волна аналогична волне, перемещающейся по поверхности воды. Чтобы понять, что такое бегущая волна, представьте себе кусок веревки, один конец которой закреплен и неподвижен, а второй зажат в вашей руке. Стоит вам взмахнуть рукой, как веревка приходит в движение, и ее движение создает именно то, что называется волной. Эта волна бежит вдоль веревки по направлению к зафиксированному концу. Где именно возникнет ее пик, в какой точке веревки, зависит от того, насколько быстро (с какой частотой) вы взмахиваете рукой.

Аналогичный этому процесс происходит и во внутреннем ухе: бегущие волны возникают в жидкости, которая содержится в улитке и приходит в движение вследствие воздействия стремени на овальное окно. Эти бегущие волны перемещаются вдоль базилярной мембранны от ее основания (вблизи стремени и овального окна) к верхушке (вблизи геликотремы) (рис. 12.17).

После достижения волной пика ее движение быстро прекращается. Следовательно, бегущая волна – это уникальная форма волнового движения, при котором максимальному смещению предшествует прохождение определенных точек. Кривая, на которую укладываются эти точки, расположенные вдоль базилярной мембранны, называется **огибающей бегущей волны** (рис. 12.18).

В какой именно точке, расположенной вдоль базилярной мембранны, бегущая волна достигнет своего пика, зависит от частоты звука. Максимальное смещение, а следовательно, и форма огибающей бегущей волны для разных частот разные. Бегущая волна, возникающая под влиянием высокочастотных звуков, вызывает

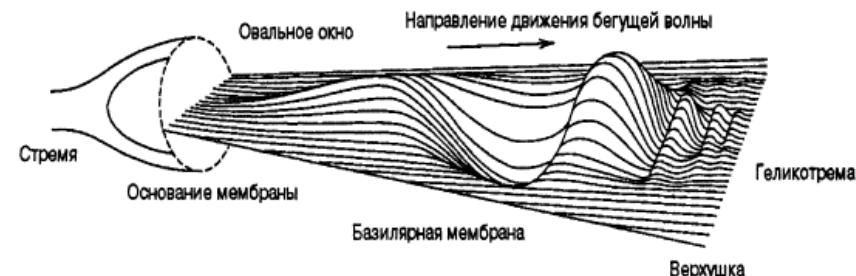


Рис. 12.17. Схематическое изображение бегущей волны, перемещающейся вдоль базилярной мембранны по направлению от основания к верхушке и деформирующей ее (улитка «развернута»)

значительное смещение лишь небольшого участка базилярной мембранны вблизи стремечка, активность большей части мембранны при этом незначительна. Низкочастотные звуки в отличие от высокочастотных создают такие бегущие волны, которые приводят в движение практически всю базилярную мембрану. Паттерн вибраций, создаваемый движением стремечка, преобразует различные звуковые частоты в разные уровни активности в разных точках, расположенных вдоль базилярной мембранны. Образование бегущей волны имеет определяющее значение для анализа звука аудиальной системой, поскольку *паттерн* смещений базилярной мембранны зависит от *частоты* звукового стимула.

Разнообразные эксперименты, проведенные Бекеши, подтвердили его предположения о переносе вибраций бегущими волнами. Созданные им механические модели, которые в точности воспроизвели и эластичность компонентов внутреннего уха, и характер их взаимодействия, позволили получить информацию о сенсорных эффектах многих физических процессов, протекающих в улитковом канале (Békésy, 1955). Однако Бекеши не ограничился одними механическими моделями, он проводил также и эксперименты, в которых непосредственно оценивал активность улитки, используя для этого различные анатомические препараты улитки человека и животных. В некоторых опытах он помещал в улитку тончайшие порошки, металлические или угольный, и под микроскопом наблюдал за их движением во время стимуляции улитки. Он также прорезал окошки в разных местах улитки человека и изучал зависимость паттернов вибрации базилярной мембранны от частоты источника звука, генерирующего бегущую волну. Результаты одного из этих экспериментов графически представлены на рис. 12.19.



Рис. 12.18. Огибающая тона с частотой 200 Гц

Форма огибающей определяется набором точек, через которые проходит бегущая волна, перемещающаяся вдоль базилярной мембранны. (Источник: Bekesy, 1953)

Паттерны движения практически совпали с теми паттернами, которые Бекеши наблюдал, работая с механическими моделями. Следовательно, изменения положения максимального смещения базилярной мембранны при изменении частоты источника стимуляции овального окна имеют системный характер.

Итак, по данным Бекеши, движение стремечка относительно овального окна вызывает смещение жидкости и образование бегущей волны, которая начинается у основания базилярной мембранны и перемещается в сторону ее верхушки. На своем пути волна стимулирует улитковый канал и механически смещает прилегающие к нему структурные элементы улитки, в первую очередь — реснички волосковых клеток. Как видно из рис. 12.20, высокочастотные колебания создают бегущие волны, которые достигают максимального смещения в точке, лежащей вблизи стремечка, и быстро гаснут. В отличие от них низкочастотные колебания приводят к образованию бегущих волн, максимальные смещения которых, достигаемые вблизи верхушки улитки, несколько сглажены. При стимуляции источниками очень низких частот смещается почти вся базилярная мембранны целиком, однако максимум колебаний приходится на верхушку. Таким образом, можно сказать, что теория места описывает пространственный частотный код.

В этой связи уместно подчеркнуть следующее. Во-первых, местоположение пика бегущей волны определяется *частотой* стимула. Высокочастотные звуки создают бегущие волны, пики которых располагаются в непосредственной близости от области стремени (рис. 12.20), а низкочастотные звуки создают более широкие волны с относительно сглаженными пиками, располагающимися вблизи верхушки. Во-вторых, пик бегущей волны — это *место* наибольшего смещения базилярной мембранны. Следовательно, и смещение волосковых клеток, лежащих на этом участке мембранны, и их ресничек под воздействием ее максимального смещения тоже максимально. Иными словами, частота колебаний и соответствующая ей бегущая волна вызывают максимальное смещение базилярной мембранны в одном определенном месте, стимулируя тем самым определенную группу волосковых клеток (реснички клеток наклоняются в сторону текториальной мембранны, представленной на рис. 12.14). Следовательно, основой анализа частоты является дифференциация состояний базилярной мембранны (Ruggero, 1994).

На основании теории места был объяснен не только механизм восприятия звуков разной частоты, но и то, как базилярная мембранны участвует в обработке информации об амплитуде, или интенсивности, звука (т. е. звуков разной громкости). Считается, что чем интенсивнее звук, тем больший участок базилярной мембранны участвует в его восприятии (Glaser & Haven, 1972). Следовательно, при постоянной частоте амплитуда, или высота, пика бегущей волны определяется интенсивностью звука. Увеличение амплитуды колебания базилярной мембранны интенсифицирует стимуляцию волосковых клеток и ресничек и их контакт с текториальной мембранны, а также повышает активность нервных волокон, что приводит к более ярко выраженной нейронной активности и, как следствие, к усилению восприятия громкости.

Подводя итог, можно сказать, что в соответствии с теорией места частотный анализ и восприятие высоты звука определяются строгой дифференциацией активности различных участков базилярной мембранны и тем, какие именно волосковые

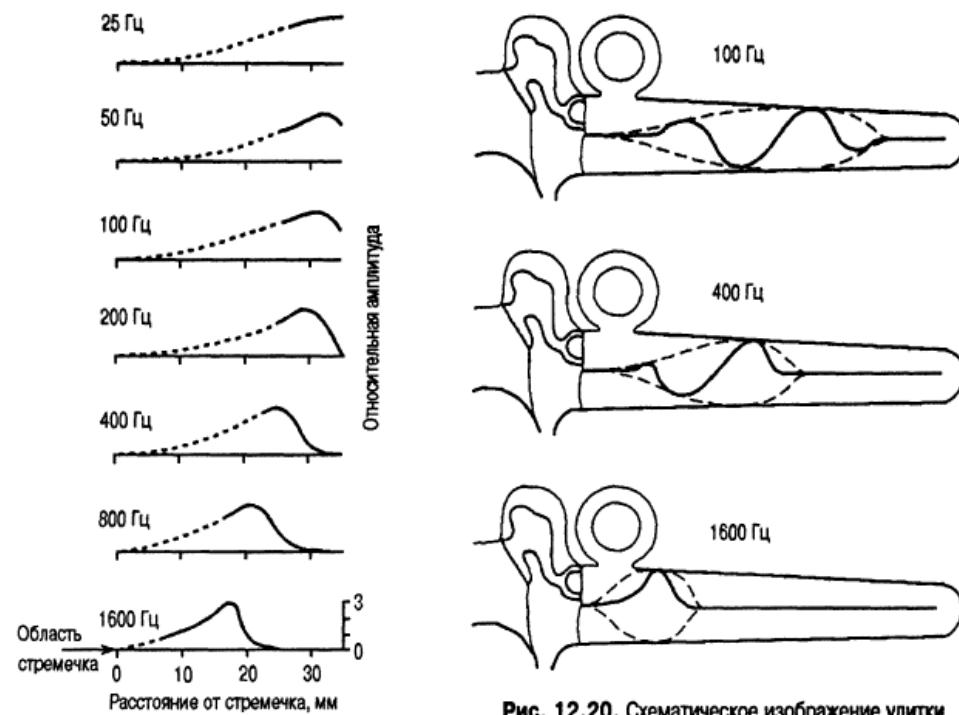


Рис. 12.19. Огибающие колебаний базилярной мембранны (анатомический препарат) при разных частотах

По мере увеличения частоты стимула амплитуда максимального смещения постепенно сдвигается к стремени. Сплошными линиями описаны реальные экспериментальные данные, пунктиры — экстраполяция. (Источник: Bekesy, 1949)

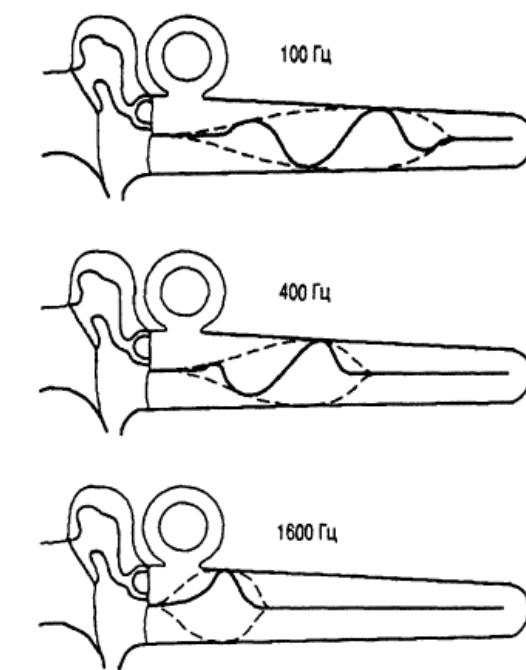


Рис. 12.20. Схематическое изображение улитки, бегущих волн и их огибающих для трех разных частот

Обратите внимание на то, что бегущая волна, созданная низкой частотой (100 Гц), растянулась почти вдоль всей длины улитки, но амплитуда ее смещения сравнительно плоская. Обращаем ваше внимание также и на то, что с увеличением частоты пик, соответствующий максимальному смещению бегущей волны внутри каждой огибающей, постепенно, но неуклонно смещается в сторону основания (в область стремени). Как следует из самого нижнего рисунка (1600 Гц), смещение внутри улитки, создаваемое высокими частотами, ограничено областью стремени. (Представленные данные имеют приблизительный характер.) (Источник: Yost & Nielsen, 1977)

клетки иннервируются. Обработка информации об интенсивности, или амплитуде, аудиального стимула и возникающее вследствие этой обработки ощущение громкости звука определяются уровнем нейронных импульсов, генерируемых в результате смещения базилярной мембранны.

Временная теория

Основной альтернативой теории места, созданной Бекеши, является временная теория (ее также называют частотной, или телефонной, теорией) (Wever & Bray, 1930). Сторонники этой теории исходят из того, что базилярная мембранны колеблется как единое целое, воспроизводя частоту колебания звука. В результате этого потенциалы действия в нейронах аудиальной системы возникают с той же самой

частотой, какая присуща звуковому стимулу. Следовательно, частота передается слуховому нерву напрямую, в результате колебаний структурных элементов улитки, и этот процесс во многом похож на передачу звуков диафрагмой телефонного аппарата или микрофона. Так, при частоте стимула 250 Гц слуховой нерв пропускает 250 нервных импульсов в секунду, при частоте 500 Гц и 1000 Гц – соответственно в два и в четыре раза больше. Согласно временной теории, воспринимаемая высота звука определяется частотой прохождения импульсов по слуховому нерву, которая, в свою очередь, коррелирует с частотой звуковой волны. Следовательно, в восприятии абсолютной высоты тона роль анализатора принадлежит мозгу.

Экспериментальные данные о кодировании сравнительно низких частот подтверждают теорию соответствия частоты, согласно которой паттерн возникновения потенциалов действия в слуховом нерве синхронен частоте аудиального стимула (Rose et al., 1967). Например, в ответ на стимуляцию звуком с частотой 250 Гц потенциалы действия в нервных волокнах слухового нерва должны возникать раз в 4 мс, или 250 раз в секунду. Таким образом, благодаря **фазовому, или временному, запиранию** время между импульсами будет определяться частотой звука, а это значит, что паттерн импульсов в слуховом нерве регулярен и имеет временную **«привязку»** к частоте стимула. Следовательно, информация о частоте аудиального стимула может быть закодирована и передана паттерном нейронной активности слухового нерва во времени.

Убедительные доказательства правоты сторонников временной теории получены при изучении механизма детектирования и различения частот рыбами. У рыб есть и волосковые клетки, и слуховые нервы, но отсутствуют такие периферические анализаторы частоты, как улитка или базилярная мембрана, необходимые для реализации механизма, лежащего в основе теории места. Однако исходя исключительно из эффекта запирания фазы исследователи установили, что рыбы некоторых видов, в том числе золотая рыбка, чувствительны к звукам с частотой от 100 до 4000 Гц, причем пик их чувствительности соответствует частотам от 600 до 700 Гц (Weiss, 1966; Weiss, Strother & Hartig, 1969). Точно так же, основываясь только на механизме, предложенном создателями временной теории, Фэй доказал, что золотая рыбка различает звуки в интервале частот вплоть до 1000 Гц (Fay, 1970).

Принцип «очередности». Основной аргумент критиков временной теории заключается в том, что частота возникновения потенциалов действия в единичном нервном волокне ограничена 1000 потенциалов в секунду, а это значит, что оно не способно воспринимать частоты, превышающие 1000 Гц. Иными словами, единичное нервное волокно не способно воспринимать все частоты, воспринимаемые человеческим ухом. Учтя это возражение, Уивер и Брэй внесли дополнение во временную теорию, предположив, что потенциалы действия не возникают одновременно во всех нервных волокнах (Wever & Bray, 1937). Более вероятно то, что общая нейронная активность распределена между группой слуховых нервных волокон (рис. 12.21).

Итак, Уивер и Брэй предположили, что паттерны нейронной активности слуховых волокон «кооперируются» таким образом, что в группе, или в **«очереди»**,

волокон потенциалы действия возникают в разное время, т. е. когда в одних волокнах возникают потенциалы действия, другие находятся в неактивном состоянии, характеризуемом потенциалом покоя. Результирующий эффект таков, что паттерн нейронной активности слуховых волокон совпадает с частотой звуковой волны. Иными словами, имеет место синхронизация паттерна нейронной активности нескольких волокон и частоты звукового стимула. Подобная трактовка называется **принципом «очередности»** (Wever, 1949). В пользу этого механизма свидетельствует своего рода **«очередность»**, обнаруженная при изучении активности единичных нейронов (данные, полученные для частот до 1050 Гц, представлены в работе Galambos & Davis, 1943).

Исходя из этого принципа можно также объяснить, почему изменения амплитуды, или интенсивности, звуковой волны, а следовательно и ощущение громкости звука, не зависят от его частоты. Увеличение амплитуды приводит к увеличению частоты импульсов потенциалов действия в каждом пучке. По мере увеличения амплитуды звука увеличивается и число нервных волокон, объединяющихся в **«очереди»**. Результирующим эффектом увеличения амплитуды становится увеличение общего числа потенциалов действия **«на одну очередь»**, но частота возникновения потенциалов не изменяется.

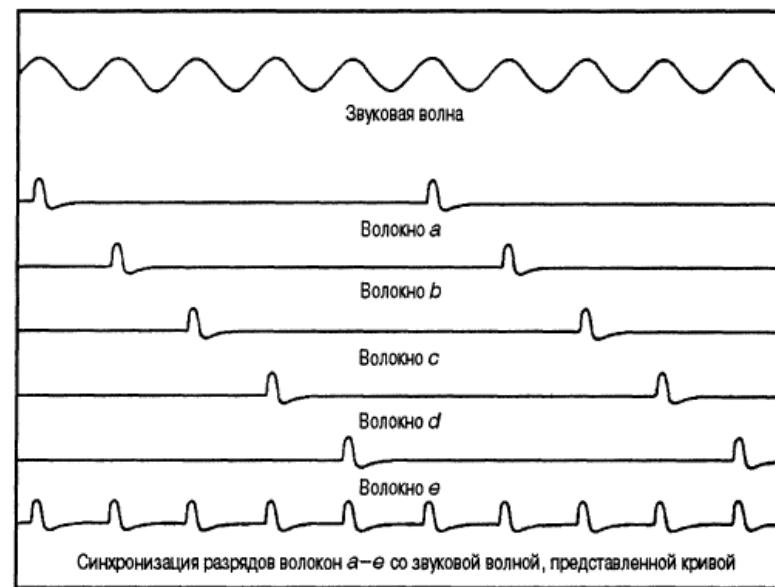


Рис. 12.21. Принцип «очередности»

Верхняя кривая – звуковая волна, скорость которой слишком велика для того, чтобы единичное нервное волокно могло синхронизироваться с ней. Но ее общая активность может распределиться между несколькими волокнами. Кривые – нервные волокна *a*, *b*, *c*, *d* и *e*, потенциалы действия в которых возникают в разное время, но таким образом, что они соответствуют разным пикам звуковой волны. Нижняя кривая описывает суммарный эффект разрядов всех волокон (от *a* до *e*): эта результирующая реакция абсолютно синхронна частоте стимульной волны

Синтез теории места и временной теории

Современная теория слуха представляет собой сочетание теории места и временной теории, а это значит, что в основе восприятия высоты тона могут лежать два не зависимых друг от друга, но взаимосвязанных механизма, каждый из которых реализуется для ограниченного интервала частот. Высокие частоты эффективно кодируются механизмом, на котором базируется теория места. Это подтверждается тем, что конкретное место смещения базилярной мембранны чрезвычайно избирательно и настроено на узкий интервал высоких частот. Действительно, высокочастотные звуки генерируют бегущие волны, пик которых приходится на совершенно определенные точки, расположенные вдоль базилярной мембранны. Этот специфический участок мембранны, в свою очередь, активирует различные группы волосковых клеток и слуховых волокон.

Однако вспомните, что звуковые волны с частотами ниже 1000 Гц создают весьма широкий и плоский паттерн вибраций базилярной мембранны (см. рис. 12.19 и 12.20). Это значит, что ее максимальное смещение значительно менее специфично, чем смещение под воздействием высокочастотной стимуляции, и не имеет такой строгой локализации. Следовательно, объяснение восприятия низких частот создает для теории места некоторую проблему, ибо, как уже отмечалось выше, теория места исходит из того, что определенной частоте соответствует максимальное смещение совершенно определенного участка базилярной мембранны. Однако временной теории вполне по силам решить ее: при частотах, не превышающих 1000 Гц, вся базилярная мембрана целиком вибрирует синхронно частоте изменений давления, фиксируемой улиткой.

Есть все основания считать, что в кодировании информации о частоте задействованы оба механизма — и механизм, лежащий в основе теории места, и механизм, на котором базируется временная теория. Уверен, самому активному стороннику временной теории, принадлежат следующие слова: «Когда речь идет о восприятии низких частот, правит бал временная теория, когда речь идет о высокочастотных волнах — теория места, а когда речь идет о средних частотах, они работают вместе» (Wever, 1949, р. 190). Бекеши тоже признавал, что в восприятии волн с частотой ниже 50 Гц основную роль играет механизм, предложенный авторами временной теории, в восприятии волн с частотой выше 3000 Гц — механизм, на котором основана теория места, а в интервале частот от 50 до 3000 Гц реализуются оба механизма. (Как станет ясно из материала, изложенного в главе 14, именно этот частотный интервал имеет для человека критически важное значение.)

Эта функциональная коопeração подтверждается экспериментальными данными. Результаты исследования, объектом которого был глухой на одно ухо человек, свидетельствуют о том, что в зависимости от того, какой участок слухового нерва больного уха подвергался стимуляции с помощью введенного в него электрода, наблюдались различные частотные эффекты (Simmons et al., 1965). Иными словами, в пользу теории места свидетельствует тот факт, что наблюдавшиеся частотные эффекты коррелировали с местом введения электрода (см. также Townshend et al., 1987). Однако Симмонс с коллегами получили и свидетельства в пользу временной теории: изменение стимульной частоты от 20 до 300 Гц независимо от места введения электрода приводило к изменению высоты звука, образовавшегося

в результате стимуляции (см. также: Rose et al., 1967). Для объяснения восприятия всего интервала частот, кодируемого аудиальной системой человека, нужны оба механизма.

Патологии слуха

К патологиям слуха относятся различные его нарушения, начиная с тех, которые проявляются в систематическом нарушении восприятия звуков, и кончая полной утратой аудиальной системой способности реагировать на какие бы то ни было звуки. В этом разделе мы рассмотрим некоторые из основных патологий аудиальной системы.

Шум в ушах

Этим термином (латинское название — *tinnitus*) обозначается определенное состояние человека, выражющееся в том, что при отсутствии звукового стимула он постоянно — одним ухом или обоими ушами одновременно — слышит какой-то звук или шум. Шум в ушах может быть как времененным явлением, так и хроническим. Наиболее характерный признак этого недуга — стойкое ощущение гула или звона в ушах, причем обычно слышат высокие звуки. Шум в ушах может возникнуть по разным причинам, в том числе и без всяких патологических изменений органов слуха. Во многих случаях шум в ушах не признается заболеванием, а воспринимается врачами как симптом какой-то болезни уха. Шумом в ушах могут сопровождаться некоторые инфекционные заболевания и подъем температуры. Нередко он является следствием травмы улитки, вызванной воздействием чрезвычайно интенсивных звуков или некоторых лекарственных препаратов. Установлено, что примерно 1 % населения страдает от шума в ушах, который ослабляет и раздражает людей. С возрастом вероятность подобного состояния заметно увеличивается: от периодического шума в ушах страдают более 10 % лиц старше 60 лет.)

Причина возникновения шума в ушах изучена недостаточно, и нет отработанного метода лечения хронических случаев (Seppa, 1998). Результаты исследований, проведенных в последнее время с использованием такого метода визуализации работы мозга, как ПЭТ, позволяют предположить, что в некоторых случаях причиной шума в ушах скорее являются аномальные процессы, происходящие в аудиальной коре головного мозга, а не в улитке внутреннего уха (Lockwood et al., 1998; Rauschecker, 1999).

Большинство пациентов со временем успешно адаптируются или приспособливаются к непрекращающемуся внутреннему «шуму». Один небезинтересный метод борьбы с ним заключается в смягчении стойких фантомных звуков другими звуками, играющими роль маскирующего шума (или «маски»). Маской обычно служит «белый шум», представляющий собой сложную смесь звуков разных частот и интенсивностей, которая воспринимается как шипение выходящего под давлением пара или шум морских волн. Генератором шума-«маски» является приспособление, похожее на слуховой аппарат или портативный плеер. В некоторых случаях «маска» перекрывает и понижает уровень фантомного звука до терпимого уровня, но от шума в ушах она не избавляет.

Понижение слуха

Глухотой называется состояние, при котором пороговые уровни восприятия речи превышают 92 дБ (Davis & Silverman, 1978). При этих условиях нормальная аудиальная коммуникация практически невозможна. Что же касается **понижения слуха**, то этим термином обозначается поддающееся измерению снижение чувствительности аудиальной системы, не препятствующее аудиальной коммуникации. Известно, что клинически значимое понижение слуха, эквивалентное утрате приблизительно 25 или более дБ, имеют примерно 16 % взрослых (Davis, 1988; Steel, 1998). Ниже речь пойдет именно об этом — о понижении слуха.

Влияние старения: пресбиакузис. Понижение слуха, вызванное старением, называется **пресбиакузисом**, или **пресбиакузией** (от греческих слов *presbus* — «старый», и *akousis* — «слух»). В настоящее время старение признано наиболее распространенной причиной снижения функции среднего уха, и не исключено, что именно оно — прямо или косвенно — является основной и единственной причиной, вызывающей более 40 % всех случаев патологии слуха. По данным одного недавно опубликованного обзора, понижение слуха, оцениваемое более чем в 25 дБ, свойственно 46 % пожилых людей (средний возраст приблизительно 66 лет), и чем старше человек, тем хуже он слышит (Cruickshanks et al., 1998). То, что с возрастом слух систематически понижается, может быть следствием ряда причин: различные патологии среднего уха, потеря базилярной мембранный своей эластичности, ухудшение кровоснабжения аудиальных структур и постепенная дегенерации сенсоневральных элементов внутреннего уха и их утрата.

Связанное с возрастом понижение слуха избирательно и специфично: чувствительность к высокочастотным звукам постепенно снижается на протяжении всей жизни. Максимальная частота, воспринимаемая детьми и равная 23 000 Гц, с возрастом уменьшается. Согласно одной весьма неутешительной публикации, верхний предел частот, воспринимаемый лицами старше сорока лет, каждые полгода снижается примерно на 80 Гц (Békésy, 1957). Связанное со старением организма снижение чувствительности к высокочастотным звукам свидетельствует в пользу созданной Бекеши теории места: снижение сенсонейронной чувствительности, являющееся одной из причин пресбиакузиса, характерно прежде всего для рецепторов, расположенных у основания улитки, где в соответствии с теорией места обрабатывается информация о высокочастотных стимулах (Johnsson & Hawkins, 1972; Wiley et al., 1998).

Хотя пресбиакузис, возможно, и является прямым следствием неизбежного возрастного снижения чувствительности нейронных и опорных структур, не исключено, что косвенно на этот процесс влияют и другие причины, такие, например, как инфекционные заболевания, периодическое воздействие очень громких звуков, а также имевшие место на протяжении всей жизни различные «акустические события».

Завершая рассмотрение вопроса о влиянии старения на слух, нельзя не отметить, что постепенное понижение слуха может отражаться как на социальных связях человека, так и на состоянии его психики. Клиническое и аудиометрическое обследования пожилых пациентов, страдающих психическими расстройствами,

показало, что среди тех, кому был поставлен диагноз **клиническая паранойя**, подавляющее большинство глухих людей или лиц со значительно пониженным слухом (Zimbardo, Anderson & Kabat, 1981). (**Паранойя** — общее название психических расстройств, характеризующихся маниакальной убежденностью в чем-либо, например манией величия, манией преследования или манией неприятия обществом.) Одна из причин, по которым наступление глухоты или значительное понижение слуха в пожилом возрасте могут благоприятствовать развитию паранойи, заключается в постепенности этих процессов, сопровождаемых снижением способности распознавать слова (Wiley et al., 1998). Поскольку понижение слуха — процесс постепенный, человек может даже не догадываться о том, что стал хуже слышать. Большинство лиц, страдающих пресбиакузисом, узнают о своей проблеме лишь тогда, когда члены семьи или друзья привлекают к ней их внимание. А это значит, что человек, не осознавший того, что стал хуже слышать, постоянно сталкивается с ситуациями, когда он не слышит, что говорят другие; хотя на самом деле люди разговаривают совершенно нормальными голосами, ему кажется, что они шепчутся, и он выражает им свое неудовольствие. Попытка окружающих объяснить, что никто не шептался, может быть воспринята пожилым, плохо слышащим человеком, как ложь: раз он ничего не слышал, значит, люди вокруг него шептались. Неправильный вывод приводит к обиде на людей и к враждебности по отношению к ним. С течением времени связи с окружающими ослабевают, и в какой-то момент человек остается один, без поддержки, необходимой для того, чтобы он мог избавиться от ложных представлений или пересмотреть их.

Кондуктивное и сенсоневральное понижение слуха. В зависимости от вызвавших его причин понижение слуха может быть либо **кондуктивным**, либо **сенсоневральным**. **Кондуктивное понижение слуха** — следствие снижения чувствительности структур аудиальной системы, проводящих звук, и в первую очередь — наружного слухового канала, барабанной перепонки или слуховых косточек. **Сенсоневральное понижение слуха** — результат дисфункции или травмы слухового нерва, структур, образующих кортиев орган, или других, непосредственно связанных с ними нейронных структур улитки. Как станет ясно из следующего подраздела, количественное понижение слуха, вызванное обеими этими причинами, можно измерить с помощью специального прибора — **аудиометра**, результаты обследования на котором используются для построения графиков, называемых **аудиограммами** и отражающими степень понижения слуха.

Аудиометр. Обычно аудиометр имеет некий генератор звука, с помощью которого могут быть получены чистые тона разных частот, и позволяет устанавливать интенсивность на уровнях, соответствующих порогу аудиального восприятия. Портовое значение интенсивности, определенное в ходе обследования отдельно для каждой частоты, сравнивается с ранее установленными нормами или стандартами. Результатом обследования является график, называемый **аудиограммой** и показывающий любое отклонение от нормальной чувствительности, т. е. он содержит информацию о понижении слуха (в децибелах) для каждой из тестовых частот.

Типичная аудиограмма представлена на рис. 12.22. Кривая, описывающая нормальный слух (кривая A), близка к нулевому уровню понижения слуха практичес-

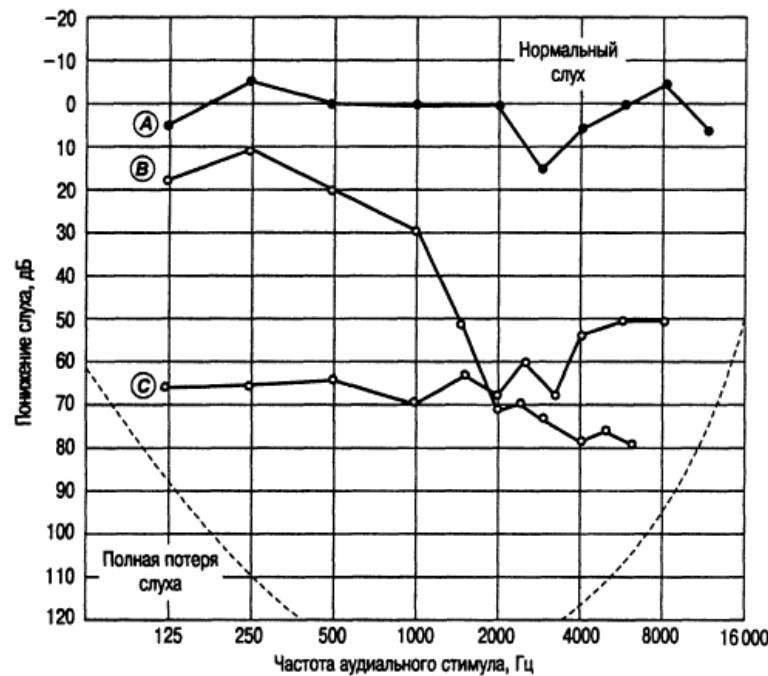


Рис. 12.22. Типичная аудиограмма

Нормой считается линейный отрезок кривой А (понижение слуха равно нулю), описывающий средние результаты обследования многих людей. Остальные участки этой кривой соответствуют нормальным отклонениям от этих средних значений. Пунктирная линия внизу соответствует полной потере слуха. А – типичное нормальное ухо. В – резкое понижение слуха, максимальное для звуков высоких частот, что характерно для сенсоневрального понижения слуха. С – постепенное понижение слуха, характеризующееся практически равным понижением чувствительности к разным частотам, что характерно для кондуктивного понижения слуха.

ски для всех частот, что свидетельствует об отсутствии понижения слуха. Остальные кривые типичны для людей с пониженным слухом. Кривая В описывает **сенсоневральное понижение слуха**, при котором чувствительность к высоким частотам снижается гораздо быстрее чувствительности к низким частотам. Кривая С описывает весьма значительное **кондуктивное понижение слуха**, проявляющееся в примерно одинаковом уменьшении чувствительности ко всем частотам.

Метод Бекеши, или метод слежения: тональные пробелы. Аудиограмма, или аудиометрическая функция, иного вида, представленная на рис. 12.23, получена в результате использования другого метода измерения потери слуха, известного как **метод Бекеши, или метод слежения**.

Этот метод, представляющий собой вариант метода доведения стимулов, описанный в главе 2, основан на том, что испытуемый сам генерирует с помощью прибора тоны разных частот, интенсивности которых соответствуют пороговым уровням восприятия. Когда испытуемый слышит звук, он нажимает кнопку, а когда звук становится неслышимым, – отпускает ее. При нажатии кнопки интенсивность звука уменьшается, а при отпускании – увеличивается.

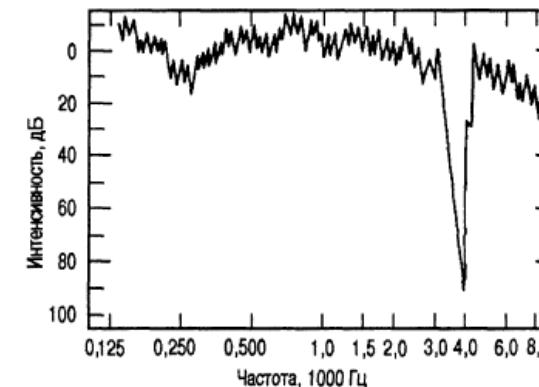


Рис. 12.23. Аудиометрическая функция, полученная по методу Бекеши, или методу слежения

Кривая отражает зависимость порога интенсивности от частоты. Тональный пробел – свидетельство того, что испытуемый не слышит звуки, частота которых равна приблизительно 4000 Гц.

Процедура выполняется следующим образом. Сначала испытуемому предъявляется тон определенной частоты, интенсивность которого ниже порога восприятия, а затем интенсивность тона постепенно увеличивается до тех пор, пока он не станет слышимым. После этого испытуемый начинает нажимать кнопку, и интенсивность тона постепенно уменьшается до тех пор, пока он не перестает восприниматься. В этот момент испытуемый перестает нажимать на кнопку, и интенсивность тона постепенно начинает возрастать. Она возрастает до тех пор, пока звук не становится слышимым, после чего испытуемый вновь нажимает на кнопку. Иными словами, испытуемый то нажимает на кнопку, то отпускает ее, вследствие чего интенсивность тона незначительно отклоняется от порогового значения. Кроме того, частота тона автоматически изменяется, постепенно возрастая, а это значит, что результатом испытания становится аудиограмма испытуемого, на которой последовательно зафиксированы воспринимаемые им пороговые значения интенсивностей звуков разных частот. Аудиограмма записывается на диаграммной бумаге потенциометром, который соединен с аудиометром. По мере того как постепенно изменяется частота тона, перо потенциометра скользит вверх и вниз по диаграммной бумаге (около некой средней линии), изменяя направление движения каждый раз, когда испытуемый нажимает на кнопку или отпускает ее; зигзагообразный характер аудиограммы на рис. 12.23 объясняется именно этим. Метод Бекеши очень полезен в клинических условиях, ибо позволяет выявить то, о чем сам испытуемый, возможно, даже и не подозревает: существование узкого интервала частот, к которому он совершенно не чувствителен, так называемого **тонального пробела**.

Причины понижения слуха и глухоты

Болезнь, травма, лекарственные препараты. Понижение слуха и глухота могут быть следствием многих внешних причин и обстоятельств, включая хронические инфекционные (в первую очередь – вирусные) заболевания среднего и внутреннего уха, внутриутробное заражение вирусом краснухи, заболевания сосудов, акус-

тическую неврому (опухоль), акустическую травму, продолжительное воздействие громкого шума и лечение большими дозами таких антибиотиков, как стрептомицин, гентамицин, неомицин и канамицин. Патологическое воздействие некоторых антибиотиков на аудиальную систему столь сильно, предсказуемо и так быстро проявляется, что именно они были использованы в качестве химических агентов при изучении последствий селективной деструкции волосковых клеток кортиева органа (Cazals et al., 1980; Prosen et al., 1981). Ирония судьбы заключается в том, что губительное воздействие некоторых антибиотиков на волосковые клетки впервые было обнаружено тогда, когда начали использовать стрептомицин для лечения туберкулеза (Rosenzweig & Leiman, 1982).

Помимо антибиотиков временной или необратимой потере слуха способствуют также и другие лекарственные препараты (например, аспирин в больших дозах, хинин, некоторые диуретики) и такие химические вещества, как оксид углерода, свинец, ртуть, а также табачный дым (McFadden & Plattsmier, 1983; Stypulowski, 1990; Zelman, 1973). При обследовании двух групп лиц среднего и пожилого возраста — курильщиков и некурящих — оказалось, что число людей с пониженным слухом среди первых в 1,7 раза больше, чем среди вторых (понижением слуха признавалось уменьшение нормального показателя более чем на 25 дБ) (Cruickshanks et al., 1998). Тенденция к снижению слуха заметнее проявляется и у тех некурящих людей, которые живут под одной крышей с активными курильщиками.

Наследственность. Врожденная глухота нередко бывает наследственной. Из каждой 1000 новорожденных 1 ребенок глухой, и установлено, что примерно половина всех случаев врожденной глухоты — результат проявления наследственности (Morell et al., 1998). Изучение проблемы на генетическом уровне выявило существование ряда генов, которые потенциально могут быть причиной врожденной глухоты, однако некоторые из этих генов пока еще не идентифицированы.

Завершая этот параграф, мы снова должны вернуться к тому, с чего начали: наиболее распространенная причина понижения слуха — *старение* (см. выше параграф, посвященный пресбиакузису). Не исключено, что в некоторых случаях понижение слуха, проявляющееся довольно поздно, уже в пожилом возрасте, может быть следствием некой специфической мутации генов (Morell et al., 1998; Steel, 1998).

Понижение слуха под воздействием избыточной звуковой стимуляции. Одним из результатов воздействия на человека аномально громких звуков или шума (т. е. нежелательных звуков), который заслуживает специального упоминания, является **понижение слуха вследствие избыточной звуковой стимуляции**. Воздействие избыточной и продолжительной звуковой стимуляции — «загрязняющего окружающую среду шума» (*noise pollution*) — способно вызвать значительное снижение слуха, которое может оказаться временным или необратимым. Установлено, что от последствий такой стимуляции постоянно страдают более 16 миллионов американцев.

Для тех, чья работа связана с длительным пребыванием под воздействием громкого шума, понижение слуха — профессиональное заболевание. Результаты одного из первых исследований этой проблемы свидетельствуют о том, что абсолютный

слуховой порог рабочих, которые 5 дней в неделю по 8 часов ежедневно испытывали воздействие шума с интенсивностью, близкой к 100 дБ, на 35 дБ выше, чем слуховой порог испытуемых, не подвергавшихся подобному воздействию (Taylor et al., 1965). Следовательно, систематическая и чрезмерная акустическая стимуляция настолько существенно понизила их слух, что они способны услышать только звуки со значительно большими, чем нормальные, амплитудами. Прямое следствие подобной стимуляции — повреждение нейронных структур внутреннего уха. Более того (по крайней мере это, утверждение справедливо в отношении некоторых видов млекопитающих), подобные последствия может иметь и кратковременная избыточная акустическая стимуляция. Известно, например, что структурные изменения, наступающие в результате воздействия чрезмерного шума, обнаружены в улитке морской свинки — улитка морской свинки во многом идентична улитке человека — после однократной избыточной стимуляции. Так, по данным одной публикации, 30-секундное воздействие звука с интенсивностью 140 дБ вызвало серьезные повреждения наружных волосковых клеток и отрыв некоторых из них от базилярной мембранны (Lancet, 1975, p. 215). Аналогичные результаты получены и в опытах на шиншиллах: 4-минутное воздействие звука с интенсивностью 100 дБ привело к значительному снижению активности наружных волосковых клеток и базилярной мембранны улитки подопытного животного.

Некоторые формы проведения досуга, в частности посещение концертов рок-музыки, передаваемой через усилители, также могут вносить свою лепту в общее понижение слуха (Hanson & Fearn, 1975). Известно, что после этого у многих наступает временное, длящееся в течение нескольких часов, понижение слуха, иногда сопровождаемое шумом в ушах. Знакомые всем портативные плейеры тоже могут быть причиной понижения слуха, которое поддается количественной оценке. Чтобы положить конец злоупотреблениям производителей, Парламент Франции в 1966 г. принял закон, в соответствии с которым верхний предел интенсивности звуков, генерируемых подобными устройствами, не должен превышать 100 дБ. (Этот же закон обязывает производителей снабжать стереосистемы, предназначенные для индивидуального пользования, специальными наклейками, предупреждающими о том, что длительное прослушивание опасно для слуха.) Благоразумие и осторожность проявляют те, кто не пренебрегает следующим житейским правилом: если звуки, исходящие из наушников, слышит не только надевший их человек, но и окружающие, не исключено, что плейер включен на слишком большую громкость.

Установлено также, что источником избыточной, потенциально опасной аудиальной стимуляции являются и некоторые спортивные мероприятия (Weiss & Brandspiegel, 1990). Авторы измерили уровень шума, возникающего на 6 закрытых спортивных аренах во время типичных баскетбольных матчей с участием как профессиональных спортсменов, так и любителей. Разумеется, мы и без всяких цифр не сомневаемся в том, что баскетбольные матчи — шумные события. Крики и подбадривающие игроков возгласы болельщиков, топание ногами, аплодисменты и тому подобные звуки, в которые время от времени врывается громкая музыка, создают постоянный и интенсивный шумовой фон. Однако Вейсс и Брандспигель установили, что зрители, присутствующие на подобных спортивных мероприя-

тиях, не просто подвергаются воздействию внешнего шума, но что, за небольшим исключением, шум, нередко возникающий во время типичной игры, значительно превосходит по интенсивности уровень, безопасный для человеческого слуха.

Постоянное воздействие шума, интенсивность которого недостаточна высока для того, чтобы вызвать понижение слуха, тоже может оказывать вредное влияние как на физиологию человека, так и на его психику. В работе (Evans et al., 1998) представлены сравнительные данные, полученные в результате изучения стрессового состояния группы детей до и после открытия международного аэропорта, вблизи которого они жили. Основываясь на результатах измерения артериального давления и оценке содержания гормона стресса, авторы пришли к выводу, что постоянное воздействие шума, создаваемого двигателями самолетов, привело к значительному ухудшению психофизиологического состояния детей.

Логика изложения подсказывает, что наступила очередь предостережений. Мы живем в окружении источников разнообразных звуков, и потенциальная угроза понижения слуха вследствие воздействия шума повышенной интенсивности существует всегда. Но когда это понижение начинается, оно прогрессирует настолько медленно, что его можно просто не заметить. К тому же человек, чей слух понизился в результате воздействия слишком громких звуков, способен воспринимать только достаточно интенсивные звуки, а это только ухудшает состояние его аудиальной системы. Хотя мы не можем ни исключить из своей жизни многие ситуации, связанные с повышенным шумом, ни даже избежать их, следует отдавать себе отчет в том, что они потенциально опасны, и быть бдительными.

Сравнительная анатомия аудиальных структур

Теперь мы уже знаем, что человеческое ухо — исключительно сложный и эффективный орган. Однако многие из основных процессов, протекающих в нем, и лежащие в основе этих процессов механизмы присущи также и органам слуха многих низших видов позвоночных. А это значит, что изучение слуха и аудиальных структур этих видов может помочь нам понять функции органов слуха человека.

Строение аудиальных структур черепахи, птицы и млекопитающего схематически представлено на рис. 12.24.

Различные кольцеобразные структуры — это *вестибулярные органы*, воспринимающие гравитацию и поддерживающие равновесие (они будут подробно описаны в главе 15). Здесь же уместно отметить, что базилярная мембрана (и улитка) у млекопитающих длиннее, чем у их эволюционных предшественников. Самые короткие базилярные мембранны у земноводных и рептилий, у птиц они несколько длиннее, а самые длинные базилярные мембранны у млекопитающих (Manley, 1971).

Очевидно, что определенные аспекты аудиального восприятия непосредственно связаны с длиной базилярной мембранны. Именно от нее зависит интервал частот, воспринимаемых животным. Чем длиннее базилярная мембрана животного, тем выше частота улавливаемых им звуков. Мастертон и Даймонд так объясняют эти филогенетические различия: «Поскольку звуки различной частоты стимулируют различные участки базилярной мембранны, можно не сомневаться в том, что увеличение длины этого органа-рецептора — результат той жизненно

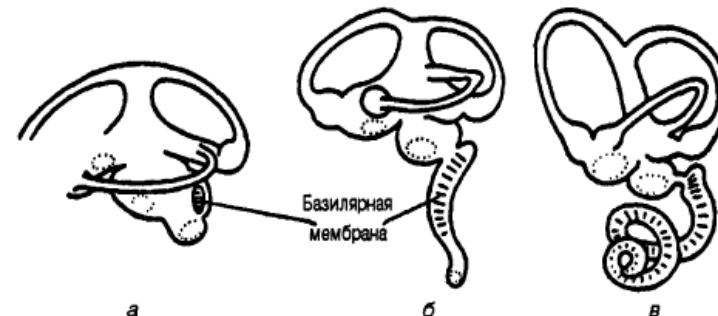


Рис. 12.24. Органы слуха черепахи (а), птицы (б) и млекопитающего (в)

Базилярная мембрана млекопитающего значительно превосходит по длине базилярную мембрану птицы, которая, в свою очередь, длиннее базилярной мембранны черепахи. Параллельными штрихами на базилярных мембранных обозначены окончания нервных слуховых волокон. Верхние кольцеобразные структуры и обозначенные точками эллипсы — вестибулярные органы, воспринимающие гравитацию и изменения положения тела в пространстве, а также поддерживающие равновесие. (Источники: G. von Bekesy. Frequency in the cochlea of various animals. В кн.: E. G. Wever (Trans. and Ed.). Experiments in hearing. New York: McGraw-Hill, 1960; G. von Bekesy & W. A. Rosenblith. The mechanical properties of the ear. В кн.: S. S. Stevens (Ed.). Handbook of experimental psychology. New York: John Wiley, 1951, p. 1102)

важной потребности в точном распознавании звуком широкого интервала частот, которую испытывали эволюционные предшественники млекопитающих» (Masterton & Diamond, 1973, p. 411).

Интервал воспринимаемых аудиальной системой частот определяется не только структурами внутреннего уха. Установлено, что способность к восприятию звуков, частота которых превышает 32 000 Гц, присущая исключительно млекопитающим, — это следствие эволюции слуховых косточек среднего уха (Masterton, Heffner & Ravizza, 1968).

В данном контексте определенный интерес представляет связь между габаритами животного и интервалом воспринимаемых им частот. По мнению Бекеши, минимальная частота, которую способно распознать животное, в известной мере определяется его *физическими размерами* (Békésy, 1960). Он предположил, что по мере увеличения габаритов животных предел восприятия ими низких частот снижается. Это предположение основано на том, что высокочастотные звуки лучше поглощаются средой, нежели низкочастотные звуки, а следовательно, и время звучания высокочастотных звуков меньше, как и расстояния, которые они способны преодолеть. При увеличении размера уха низкочастотные звуки, передающиеся вдоль его основных поверхностей, поглощаются в меньшей степени, чем высокочастотные. А это значит, что сравнительно длинные слуховые каналы безусловно благоприятствуют восприятию низкочастотных звуков, которые и звучат дольше, и способны преодолевать большие расстояния.

Более того, Бекеши и Розенблит считают, что благодаря предпочтительному восприятию низкочастотных звуков крупные животные получают определенные экологические преимущества: «Без сомнения, в этом проявляется мудрость природы, поскольку для крупных животных возможность слышать звуки, возника-

ющие на значительном удалении от них, исключительно важна. Если звук распространяется по земле, низкочастотные звуки поглощаются в гораздо меньшей степени, чем высокочастотные. В этом и состоит польза предпочтения, отдаваемого низким частотам» (Békésy & Rosenblith, 1951, p.1104).

В ходе эволюционного развития млекопитающие с незначительным *интерауральным расстоянием* (функциональным расстоянием между ушами) приобрели большую способность к восприятию высокочастотных звуков, чем млекопитающие с более широко расставленными ушами, и было высказано предположение, что выживание первых в большей мере зависело именно от этой способности, нежели выживание вторых. Способность слышать высокочастотные звуки (т. е. коротковолновые звуки, см. рис. 12.4) обратно пропорциональна расстоянию между ушами. Как правило, частоты, воспринимаемые мелкими животными, выше тех частот, которые воспринимают крупные животные. Поскольку высокочастотные звуки являются одновременно и более коротковолновыми, их восприятие особенно важно для локализации звука мелкими животными (в главе 14 мы расскажем об этом более подробно). Верхний предел частоты звуков, воспринимаемых млекопитающими с крупными головами и широко расставленными ушами, ниже, чем у млекопитающих с небольшими головами и незначительным интерауральным расстоянием. Так, в то время как среднее значение предела восприятия высоких частот млекопитающими равно 55 кГц, верхний предел для таких крупных животных, как слон, относительно невелик и составляет 10 кГц (Heffner & Heffner, 1980).

Таблица 12.2
Предельные значения высоких и низких частот,
воспринимаемых млекопитающими,
принадлежащими к разным видам, Гц

	Предельное значение низкой частоты	Предельное значение высокой частоты
Слон	17	10 000
Человек	20	20 000
Корова	23	35 000
Лошадь	55	33 500
Собака	60	45 000
Обезьяна	110	45 000
Крыса	650	60 000
Мышь	1000	90 000
Летучая мышь	3000	120 000

Источник: Heffner & Heffner (1983a, 1983b)

Заслуживает упоминания и еще одно наблюдение, касающееся интервала частот, воспринимаемых млекопитающими. Проанализировав информацию об интервале частот, воспринимаемых млекопитающими, принадлежащими к разным видам, Геффнер и Геффнер обнаружили определенную общую для всех видов тенденцию, которая проявляется в том, что между восприятием высоких и низких частот существует некий компромисс: при возрастании чувствительности к низким

частотам чувствительность к высоким частотам снижается (Heffner & Heffner, 1983a, 1983b). Иными словами, млекопитающие, которые сравнительно хорошо слышат высокочастотные звуки, относительно плохо слышат низкочастотные звуки, и наоборот. Некоторые усредненные данные, характеризующие эту тенденцию, представлены в табл. 12.2.

Выводы

В этой главе мы рассматривали аудиальную систему и некоторые основополагающие феномены слуха. Мы начали с описания физических свойств аудиальных стимулов — звуков — и соответствующих этим свойствам психологических параметров. Звуковые волны характеризуются частотой, равной числу изменений звукового давления в секунду и измеряемой в герцах, амплитудой, или интенсивностью, измеряемой в децибелах, и сложностью. Психологическим параметром, соответствующим частоте звука, является его воспринимаемая высота; амплитуда, или интенсивность, определяет громкость звука, а сложность — его тембр. Обсуждая такое свойство звуковых волн, как сложность, мы рассказали о том, что такое гармоники, фундаментальная частота и акустический закон Ома. Кроме того, мы также рассказали и о том, как аудиальная система анализирует аудиальный стимул по методу Фурье, т. е. выполняет анализ Фурье. Мы описали фазу звуковой волны, т. е. ту часть звуковой волны от пика, или компрессии, до подошвы, или разрежения, которая достигает данной точки в определенное время. Обсуждая понятие фазы, мы рассказали о возможности шумоподавления, основанного на генерировании звуковой волны, аналогичной той, которую нужно подавить, но расходящейся с ней по фазе на 180°. Завершая раздел, посвященный аудиальным стимулам, мы рассказали о резонансе — возрастании амплитуды колебаний объектов под воздействием источников звуков, частота которых соответствует естественной, или резонансной, частоте самих объектов.

Второй раздел данной главы посвящен анатомии органа слуха и механизмам звуковосприятия. Мы описали три основные структуры, образующие орган слуха, — наружное ухо, среднее ухо и внутреннее ухо — и физиологические явления и механизмы функционирования аудиальной системы, лежащие в основе восприятия звука, сосредоточив внимание преимущественно на процессах, происходящих в среднем и внутреннем ухе.

Основное назначение среднего уха — выравнивание импедансов, разность между которыми возникает в результате того, что сопротивление прохождению звуковой волны воздушной среды наружного уха отличается от сопротивления жидкой среды среднего уха. Мы также отметили, что среднее ухо выполняет и защитные функции, при этом основное внимание было уделено акустическому рефлексу — рефлекторному сжатию двух миниатюрных мышц среднего уха, снижающему проникновение в него чрезмерно громких звуков. Одновременно мы рассказали и о том, как евстахиева труба выравнивает давление по обе стороны барабанной перепонки — в среднем и внутреннем ухе. Мы также рассказали и о том, что благодаря костной передаче звука аудиальный стимул может достичь внутреннего уха, минуя как наружное, так и среднее ухо. Костная передача звука основана на том,

что под воздействием звука начинают вибрировать кости черепа, которые и стимулируют рецепторы внутреннего уха.

Описывая основные анатомические структуры внутреннего уха и их функции, мы уделили основное внимание кортиеву органу, располагающемуся на базилярной мембране по всей ее длине. В нем находятся колонки внутренних и наружных волосковых клеток, которые преобразуют механическую энергию звукового колебания в нейронную активность.

Рассказывая о слуховом нерве, мы особо подчеркнули его организационную и пространственную связь со смещением базилярной мембранны. Мы также обратили внимание читателей на упорядоченную пространственную организацию нейронных элементов базилярной мембранны, обрабатывающих информацию об определенных частотах. От этих нейронных элементов отходят отдельные волокна, образующие слуховой нерв и связанные с аудиальной корой головного мозга, причем пространственная организация этих нейронных структур в коре головного мозга полностью соответствует их мембранный организации, т. е. реализуется так называемая тонотопическая организация. Многие волокна слухового нерва избирательно реагируют на определенные частоты, что подтверждает представление о тонотопическом характере связи слухового нерва и слуховой коры.

Говоря о том, как внутреннее ухо преобразует механическую энергию в нейронную активность, мы подробно изложили две основные теории звуковосприятия (которые правильнее было бы назвать механизмами). теорию Бекеши, или теорию места, и временную теорию, а также рассказали о принципе пучка. В основе теории места лежит представление о системном распределении стимульных частот на базилярной мембранны; согласно теории места, нейронные структуры, расположенные вблизи основания мембранны (вблизи стремени), обладают наибольшей чувствительностью по отношению к высокочастотным стимулам, а нейроны, расположенные вблизи верхушки мембранны (вблизи геликотремы) наиболее чувствительны к низкочастотной стимуляции. В соответствии с этими представлениями различные частоты стимулируют различные участки базилярной мембранны и восприятие высоты звука определяется именно этим. Мы привели немало свидетельств в пользу теории места, включая и данные о характере перемещения бегущей волны в улитке, и данные, свидетельствующие о связи между смещением мембранны, которое строго дифференцировано, и воспринимаемой высотой звука.

Основой временной теории является представление том, что базилярная мембрана, а также слуховой нерв и его нейронные структуры вибрируют как единое целое, воспроизводя частоту изменений давления, характерную для данной звуковой волны. Вследствие этого воспринимаемая нами высота звука коррелирует непосредственно с частотой нервных импульсов, передаваемых слуховым нервом, которая, в свою очередь, коррелирует с частотой звуковых волн, достигающих барабанной перепонки.

Мы пришли к выводу о том, что в восприятии аудиальных стимулов участвуют оба механизма. В восприятии низкочастотных звуков основную роль может играть механизм, лежащий в основе временной теории, в то время как восприятие высокочастотных звуков может определяться преимущественно механизмом, на котором базируется теория места.

Предпоследний раздел главы посвящен основным патологиям слуха — глухоте и понижению слуха. Мы рассказали о таких распространенных патологиях аудиальной системы, как шум в ушах, пресбиакузис, кондуктивное и сенсонейронное понижение слуха и понижение слуха, вызванное воздействием шума. Мы также проанализировали основные возможные причины понижения слуха и рассказали о способах его измерения, без излишних подробностей описав аудиометр и метод Бекеши, или метод сложения. Мы отметили, что при оценке понижения слуха по методу Бекеши появляется возможность выявить тональные пробелы — узкие интервалы частот, совершенно не воспринимаемые человеком, хотя сам человек может даже не подозревать об этом.

Завершая главу, мы, не вдаваясь в детали, сравнили анатомические особенности органов слуха некоторых биологических видов и отметили, что в процессе филогенетического развития длина базилярной мембранны увеличилась. Мы рассказали также и о некоторых общих статистических закономерностях. Что касается млекопитающих, то их способность воспринимать высокочастотные звуки обратно пропорциональна расстоянию между ушами. Чем меньше это расстояние, тем выше воспринимаемые животными частоты. Можно сказать, что млекопитающим «приходится выбирать»: за возможность слышать высокочастотные звуки они «расплачиваются» невысокой чувствительностью по отношению к звукам низкой частоты, и наоборот.

Ключевые слова

Абсолютная высота тона (высота звука)	Евстахиева труба
Акустический закон Ома	Звуковая волна
Акустический рефлекс	Кондуктивное понижение слуха
Амплитуда	Кортиев орган
Анализ Фурье	Костная передача звука
Аудиограмма	Кривые частотной настройки
Аудиометр	Круглое окно
Базилярная мембрана	Мембрана Рейсснера
Барабанная перепонка	Метод Бекеши, или метод сложения
Барабанный канал	Молоточек
Бегущая волна	Наилучшая (характеристическая) частота
Вестибулярный канал	Наковалня
Внутренние волосковые клетки	Наружные волосковые клетки
Волокна, настроенные на определенную частоту	Наружный слуховой канал
Временная (частотная, или телефонная) теория	Овальное окно
Гармоники (обертоны)	Огибающая бегущей волны
Герц (Гц)	Понижение слуха вследствие избыточной звуковой стимуляции
Громкость	Пресбиакузис (пресбиакузия)
Децibel (дБ)	Принцип пучка
Длина волны	Разность импедансов

Резонанс
Сенсоневральное понижение слуха
Синтез Фурье
Сложность (звука)
Слуховые косточки
Стремя
Текториальная мембрана
Тембр
Теория места
Тональный пробел

Тонотопическая организация
Улитка
Улитковый (кохлеарный) канал
Ушная раковина
Фаза
Фазовое, или временное, запирание
Фундаментальная частота
Частота
Шум в ушах
Шумоподавление

Вопросы для проверки усвоения материала

- Перечислите физические и психологические параметры звука. Расскажите о частоте звуковой волны, ее амплитуде, или интенсивности, и сложности и о том, как они связаны с такими субъективными аудиальными ощущениями, как высота, громкость и тембр звука.
- Что такое децибел? Как связаны между собой увеличение звукового давления волны и увеличение ее интенсивности, выраженной в децибелах? В чем преимущество децибельной шкалы?
- Как связаны между собой сложность звука и его тембр? Отвечая на этот вопрос, расскажите о фундаментальной частоте, гармониках, анализе Фурье и акустическом законе Ома
- Что такое фаза звуковой волны? Дайте ее определение. Расскажите о том, как с помощью звуковой волны, идентичной звуковой волне нежелательного шума, но обратной ей по фазе, можно подавить этот нежелательный шум.
- Что такое резонанс? При каких условиях увеличивается амплитуда колебаний объекта, на который воздействует источник звука?
- Опишите основные анатомические компоненты наружного, среднего и внутреннего уха и путь, который проходит звук от источника звука до нейротрансмиттеров внутреннего уха.
- Какие функции выполняет среднее ухо? Расскажите о разности импедансов, об акустическом рефлексе и о роли евстахиевой трубы.
- Что такое костная передача звука? Как благодаря костной передаче звук достигает внутреннего уха, минуя наружное и среднее ухо?
- Расскажите об основных компонентах внутреннего уха и о том, как они участвуют в звуковосприятии. Отвечая на этот вопрос, обратите основное внимание на кортиев орган, на базилярную мембрану и расположенные на ней внутренние и наружные волосковые клетки.
- В чем проявляется избирательность реакции нервных волокон, образующих слуховой нерв, на различные частоты? Известно, что нервные волокна могут быть селективно и точно настроены на восприятие определенных частот. Как исходя из этого явления можно объяснить восприятие высоты

- звука? Отвечая на этот вопрос, не забудьте рассказать о кривых частотной настройки.
- Сравните две теории восприятия высоты звука теорию места и временную теорию. Чем одна теория отличается от другой и как они дополняют друг друга? Каков статус теорий восприятия высоты звука? Какие факты свидетельствуют в пользу каждой из этих теорий? Отвечая на этот вопрос, расскажите о принципе пучка и о том изменении, которое он внес во временную теорию.
 - Что такое бегущая волна? Почему ее образование на базилярной мембране подтверждает механизм восприятия высоты звука, лежащей в основе теории места?
 - Расскажите о том, как теория места и временная теория трактуют обработку информации об интенсивности звука и связь интенсивности звука с воспринимаемой громкостью.
 - Расскажите об основных патологиях аудиальной системы. Чем нарушения слуха, вызванные заболеваниями, отличаются от нарушений, причинами которых являются избыточная аудиальная стимуляция и старение организма? Какая разница между кондуктивным и сенсоневральным понижением слуха?
 - Что такое аудиометр? Почему метод Бекеши, или метод сложения, можно считать методом определения абсолютного порога? Каким образом с его помощью выявляются тональные пробелы?
 - Расскажите о том, как воспринимаемые некоторыми биологическими видами интервалы частот связаны с анатомическими особенностями их органов слуха. Почему одни анатомические особенности благоприятствуют восприятию высоких частот, а другие — низких?

ГЛАВА 13

Фундаментальные функции слуха и связанные с ними явления

В предыдущей главе мы познакомили читателей с физическими свойствами аудиальных стимулов и с физиологическими механизмами, лежащими в основе звуковосприятия. Эта глава посвящена преимущественно сенсорным, или психологическим, эффектам простых звуков, и в первую очередь — связи перцептивных, или сенсорных, параметров слуха с определяющими их свойствами аудиальной стимуляции. Выше уже отмечались основные физические свойства простого звука: интенсивность (или амплитуда давления) и частота, от которых зависит наше восприятие громкости и высоты звука соответственно. В данной главе мы рассмотрим некоторые количественные соотношения, связывающие эти параметры между собой, и начнем с описания чувствительности аудиальной системы к интенсивности звука.

Интенсивность

Аудиальная система позвоночных чрезвычайно чувствительна. Для измерения слухового порога человека определялись минимальные интенсивности стимулов, способные вызвать ответную реакцию, или слуховое ощущение. Для звуков, частота которых приблизительно равна 3000 Гц, слуховой порог человека близок к интенсивностям, соответствующим интенсивности звуков, возникающих при неупорядоченном движении молекул веществ, образующих воздух! Эта необычайная чувствительность наряду со способностью аудиальной системы воспринимать и в миллионы раз более интенсивные звуки свидетельствуют о том что с точки зрения интервала стимулирующих его интенсивностей, физиологический механизм уха — интереснейший феномен.

Точные определения пороговых интенсивностей проводят в специально приспособленных для этого помещениях, в которых полностью отсутствуют отражающие звук объекты. Одно из них, известное под названием *заглушенная камера* (камера без эха), представляет собой комнату, в которой все стены, потолок и пол покрыты материалом, обладающим высокой звукопоглощающей способностью, что полностью исключает отражение звука, а следовательно, и возникновение помех. На рис. 13.1 представлены пороговые значения (в децибелах) для диапазона

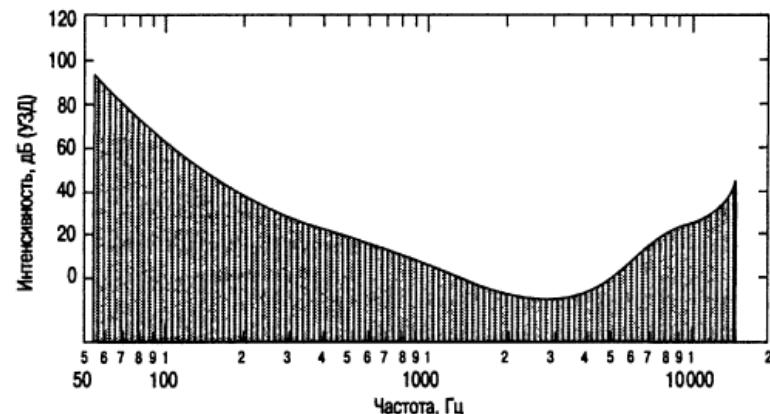


Рис.13.1. Слуховой порог как функция частоты

Испытуемый сидел лицом к источнику звука и воспринимал звук обоими ушами. Обратите внимание на то, что звуки, интенсивность (дБ) которых находятся в заштрихованной области ниже кривой, лежат ниже слухового порога, а потому не слышны. (Источник: Sivian & White, 1933)

индивидуальных частот, воспринимаемые человеком и определенные в отсутствие отражения звука.

Из рисунка следует, что чувствительность аудиальной системы человека зависит от частоты звука, а именно: каждой частоте соответствует свой собственный слуховой порог. Чувствительность максимальна, а слуховой порог минимальен для частот, равных приблизительно 3000 Гц. Это значит, что при одной и той же интенсивности звук с частотой 3000 Гц воспринимается как более громкий, чем звуки с другими частотами. Частота, равная приблизительно 3000 Гц, соответствует естественной резонансной частоте наружного ушного канала, описанного в предыдущей главе, чем и объясняется «предпочтение», оказываемое ей аудиальной системой. С точки зрения функциональности польза, которую извлекают люди из повышенной чувствительности именно к этим частотам, возможно, заключается в том, что крик с частотой 3000 Гц звучит особенно пронзительно и тревожно. Вероятно, стоит согласиться с авторами этих строк: «наш слуховой канал — словно он только и ждет критических ситуаций — открыт для любого пронзительного вопля» (Milne & Milne, 1967, p. 43).

Различение интенсивности

Важный аспект восприятия интенсивности — величина, на которую нужно изменить (увеличить или уменьшить) интенсивность аудиального стимула, чтобы испытуемый смог уловить разницу между двумя стимулами. Эта величина называется *дифференциальным порогом, или порогом различения*, и обычно обозначается как *DI* (см. главу 2). Дифференциальный порог зависит от ряда факторов, в том числе от таких свойств акустического стимула, как продолжительность, интенсивность и природа (т. е. от того, звук простой или сложный). Минимальное изменение интенсивности, или амплитуды, звука (т. е. *DI*), в результате которого два звука воспринимаются как разные, обычно равно 1–2 дБ (не исключено, что для

высокочастотных звуков эта величина несколько меньше. См. Gulick et al., 1989; Scharf & Buus, 1986). Как будет показано ниже, различение интенсивности полезно при локализации звуков.

Громкость

Вспомните, что громкость — один из психологических параметров аудиального восприятия и характеризует тот аспект слухового ощущения, который определяется физической интенсивностью звука, или амплитудой звукового давления. Однако связь между громкостью звука и его интенсивностью достаточно сложна, к тому же громкость звука определяется не только его интенсивностью.

Результаты, полученные методом Стивенса (методом определения величины, см. главу 2), свидетельствуют о том, что между громкостью и физической интенсивностью нет прямой зависимости: увеличение интенсивности вызывает меньшее, а не пропорциональное увеличение громкости. Иными словами, громкость растет медленнее, чем интенсивность. Чтобы привести в соответствие друг с другом эти два параметра, в качестве численной меры субъективной громкости была введена единица *сон* (от латинского слова *sonus* — звук. — Примеч. пер.).

Субъективная шкала громкости. Единица шкалы громкости звука, выражающая непосредственную субъективную оценку сравнительной громкости чистого тона, *сон*, была предложена Стивенсом и Дэвисом (Stevens & Davis, 1938). Один *сон* — это громкость тона с частотой 1000 Гц, уровень интенсивности которого равен 40 дБ УЗД. И сам *сон*, и связанные с ним параметры, характеризующие частоту звука и его интенсивность, были приняты в качестве стандарта громкости. Графически связь между громкостью, выраженной в *сонах*, и интенсивностью в децибелах представлена на рис. 13.2.

Внимательно рассмотрев рисунок, обратите внимание на то, что при увеличении интенсивности, отложенной на абсциссе в децибелах, на 10 дБ, громкость, отложенная на ординате в *сонах*, удваивается. Например, тон, интенсивность которого равна 70 дБ, а уровень громкости — приблизительно 8 *сонам*, в два раза громче тона, интенсивность которого равна 60 дБ, а громкость — приблизительно 4 *сонам*.

В данном контексте заслуживает внимания и вторая особенность функции, графически представленной на рис. 13.2: добавление 10 дБ приводит к почти трехкратному увеличению интенсивности тона. Применительно к изменению громкости это означает, что двукратное увеличение громкости достигается трехкратным (или на 10 дБ) увеличением интенсивности. Следовательно, исходя из графика рис. 13.2 тон, соответствующий 50 дБ УЗД и имеющий громкость, равную приблизительно 2 *сонам*, в два раза громче (и в три раза интенсивнее) тона, соответствующего 40 дБ и имеющего громкость, равную 1 *сону*. Практические последствия этого явления таковы: при увеличении интенсивности тона от 40 до 50 дБ происходит значительное увеличение его громкости. Короче говоря, добавление к тону 10 дБ утраивает его интенсивность и удваивает его громкость.

Громкость и частота

Зная только децибелный уровень звука, невозможно полностью охарактеризовать его громкость. Как уже отмечалось выше (рис. 13.2), громкость звука зависит не только от физической интенсивности, или амплитуды звукового давления, но и от

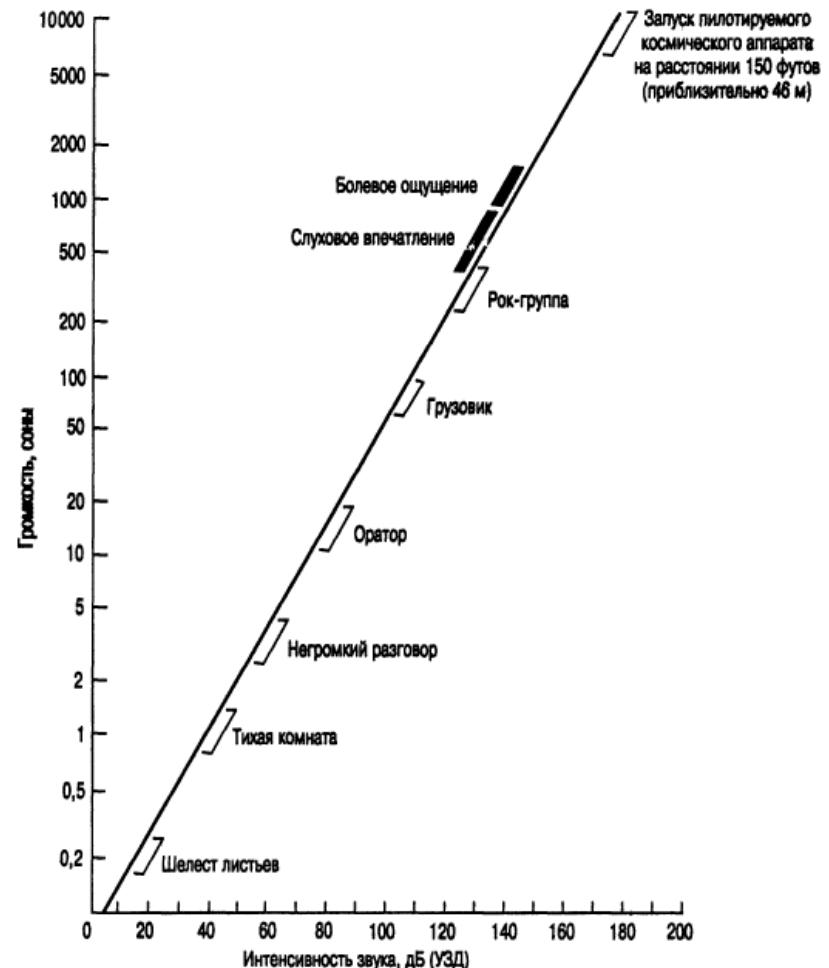


Рис 13.2. Зависимость между интенсивностью (дБ) и громкостью (*соны*)

Обратите внимание на то, что увеличению интенсивности на 10 дБ соответствует двукратное увеличение громкости (*в сонах*), т. е. связь между этими двумя параметрами описывается логарифмической функцией. (Источник: Lindsay & Norman, 1977, р. 161)

частоты звука. Зависимость громкости от частоты становится очевидной, если попытаться подобрать интенсивности двух тонов с разными частотами таким образом, чтобы они воспринимались как одинаково громкие. Если, выполнив эту задачу, сравнить интенсивности звуков, то окажется, что между ними существует значительная разница.

Контуры равной громкости. Используя методы психофизики, можно определить, при каких интенсивностях тоны с разными частотами будут восприниматься как *одинаково громкие*. Например, испытуемому предъявляют два тона, отличающихся друг от друга и по частоте, и по интенсивности. Частота и интенсивность одного тона, называемого *стандартным тоном*, постоянны, а второй тон, называе-

мый тоном сравнения, предъявляется с разными частотами и интенсивностями. Задача испытуемого — попеременно внимательно слушать стандартный тон и тон сравнения и подбирать интенсивность тона сравнения таким образом, чтобы его громкость соответствовала громкости стандартного тона. Иными словами, испытуемый изменяет уровень интенсивности тона сравнения до тех пор, пока этот тон не сравняется по громкости со стандартным. После того как подобная процедура будет выполнена для многих тонов сравнения, полученные результаты могут быть представлены графически в виде кривых, описывающих интенсивности, при которых громкость тонов разной частоты соответствует громкости стандартного тона. Эти кривые называются **контурами равной громкости** (а также *изофоническими контурами*, или — по имени авторов, которые первыми ввели их в научный оборот, *кривыми Флетчера—Мансона*). Все контуры равной громкости, представленные на рис. 13.3, получены для стандартных тонов разной громкости именно так, как описано выше.

На рис. 13.3 уровень громкости выражен в **фонах** (от греческого *phone* — звук, голос. — Примеч. пер.), которые являются мерой громкости всех тонов, лежащих

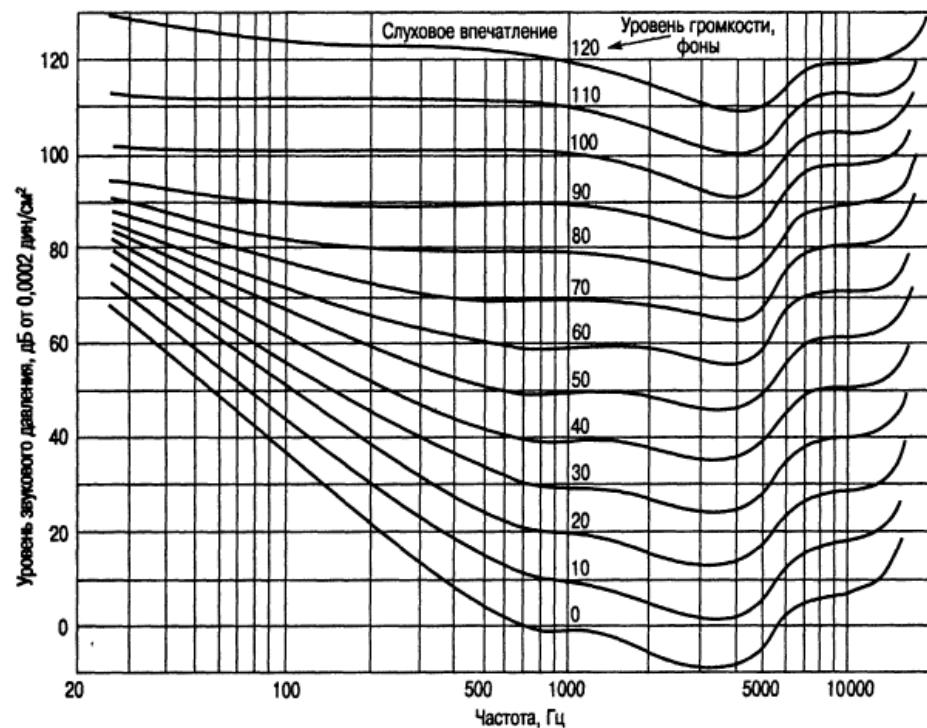


Рис. 13.3. Контуры равной громкости

Самая нижняя кривая — 0 фонов — описывает зависимость абсолютной чувствительности уха от частоты. Тоны, интенсивности которых лежат ниже этой кривой, не слышны. (Источник: H. Fletcher & W. A. Munson. Loudness, its definition, measurement, and calculation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5, 1933, p. 82–108)

на данной кривой. Все тоны, лежащие на одном и том же контуре равной громкости, звучат одинаково громко, и их громкость оценивается одинаковым числом фонов. Число фонов для данной кривой равно числу децибел стандартного тона с частотой 1000 Гц, громкость которого равна громкости всех тонов, лежащих на данной кривой. Количество фонов данного тона (независимо от его частоты) численно равно количеству децибел тона с частотой 1000 Гц, который звучит так же громко, как данный тон. В качестве примера рассмотрим кривую, отмеченную на рис. 13.3 цифрой 30. Любой звук, частота и интенсивность которого лежат на этой кривой, имеет такую же громкость, как и любой другой звук, лежащий на этой кривой, хотя частоты и интенсивности этих двух звуков и не равны между собой. Следовательно, громкость тонов с частотой 60, 300 и 6000 Гц и уровнем интенсивности 65, 40 и 35 дБ соответственно равна громкости тона с частотой 1000 Гц и уровнем интенсивности, равным 30 дБ (или в соответствии с приведенным выше определением фона 30 фонам). А это значит, что тоны с частотой 60, 300 и 6000 Гц и уровнем интенсивности 65, 40 и 35 дБ соответственно имеют одинаковую громкость, уровень которой соответствует 30 фонам, и любой звук, частота и интенсивность которого укладываются на эту кривую (т. е. на кривую «30»), имеют громкость, уровень которой соответствует 30 фонам. (Важно не путать фон с соном, который описан в предыдущем подразделе. Фон используется исключительно в качестве удобного способа оценки уровня громкости любого тона относительно интенсивности равного ему по громкости тона сравнения с частотой 1000 Гц.)

Кривые, на рис. 13.3 отражают зависимость воспринимаемой громкости звука от его частоты и интенсивности и являются источниками важной информации о восприятии громкости, в частности о том, в какой мере громкость зависит от частоты. Во-первых, большинство кривых имеют волнобразный характер, что свидетельствует о том, что громкость данного тона зависит от его частоты. Так и есть: тоны одинаковой интенсивности, но с разными частотами отличаются друг от друга по громкости. Влияние частоты на громкость наиболее отчетливо проявляется при средних и низких уровнях интенсивности (около 60 фонов и ниже); при высоких уровнях интенсивности (выше 60 фонов) частота практически не играет никакой роли в восприятии громкости: контуры равной громкости близки к прямым линиям. Это значит, что для громкости достаточно интенсивных тонов характерна определенная тенденция: она не зависит от частоты. При среднем и низком уровнях интенсивности, тоны с частотами ниже 1000 Гц и выше 4000 Гц звучат менее громко, чем звуки той же самой интенсивности и с частотами в интервале от 1000 до 4000 Гц. Вогнутость соответствующих участков контуров равной громкости свидетельствует о том, что для того, чтобы тоны с этими частотами имели ту же громкость, что и тоны, частоты которых соответствуют интервалу от 1000 до 4000 Гц, они должны быть более интенсивными. Степень вогнутости кривых свидетельствует также и о том, в какой мере низкие и высокие частоты нуждаются в дополнительной интенсивности для того, чтобы громкость тонов поддерживалась на постоянном уровне.

Эта зависимость обнаруживается не только в лабораторных условиях при изучении простых звуковых волн, но и в обычных житейских ситуациях. Так, если уровень интенсивности передаваемой по радио музыки низок, может создаться

впечатление, что ей не хватает басовых звуков. Причина подобного явления заключается в том, что при низком уровне интенсивности чувствительность нашего слуха к низкочастотным звукам, воспринимаемым нами как басовые, понижается. Именно из-за этого многие стереоусилители имеют компенсирующий контур – специальное приспособление, предназначенное для прослушивания музыки при низких уровнях интенсивности, называемое *тонкомпенсатором* (некоторые усилители имеют кнопку, помеченную словом «тонкомпенсация»), которое усиливает низкие, а иногда и очень высокие частоты. Иными словами, вводя добавочное количество низких частот, контур тонкомпенсации тем самым восполняет пониженную чувствительность нашего слуха к ним. Это необходимо, ибо при уменьшении громкости усилителя (употребление этого термина в данном контексте неправомочно) относительная громкость звуков разных частот изменяется по-разному (рис. 13.3).

Частота

Хотя восприятие звука – результат взаимодействия интенсивности и частоты, многие аспекты восприятия частоты можно выделить и проанализировать отдельно. Человек с нормальным, или типичным, слухом воспринимает частоты в интервале от 20 до 20 000 Гц. Звуки с частотой ниже 20 Гц вызывают ощущение вибрации, или «дрожи», а ощущение от звуков с частотой выше 20 000 Гц можно сравнить с легкой щекоткой. Как мы уже отмечали выше (см. рис. 13.1 и 13.3), слуховой порог зависит и от интенсивности звука, и от его частоты, и человек может услышать лишь те звуки с очень высокими частотами, которые достаточно интенсивны.

Различение частоты

Вопрос о различении частот (т. е. вопрос о дифференциальном пороге) столь же уместен, как и вопрос о различении интенсивностей, и звучит так: каким должно быть минимальное изменение частоты (Δf), чтобы наблюдатель зафиксировал его? Результаты некоторых исследований свидетельствуют о том, что при средних интенсивностях звуков человек способен уловить разницу в частотах, равную 3 Гц (в интервале частот до 1000 Гц) (Hagris, 1952). В интервале частот от 1000 до 10 000 Гц различимость постоянна: отношение Вебера для этого диапазона частот в широком интервале интенсивностей остается неизменным, а именно $\Delta f/f$ приблизительно равно 0,004. Так, чтобы быть воспринятой, разница в частотах двух звуков с частотой, примерно равной 10 000 Гц, должна быть равна 40 Гц ($0,004 \times 10 000 \text{ Гц} = 40 \text{ Гц}$). Это значит, что если частота продолжительного тона, равная 10 000 Гц увеличится или уменьшится на 40 Гц и станет равна 10 040 или 9960 Гц соответственно, то это изменение будет зафиксировано наблюдателем.

Важным фактором, от которого зависит определение минимально воспринимаемого изменения частоты (дифференциального порога, или порога различения, частоты), является уровень интенсивности воспринимаемых наблюдателем звуков. Уменьшение интенсивности стимула приводит к увеличению дифференциального порога (Δf) частоты. Иными словами, чем тише звук, тем труднее определить, что он отличается от других звуков, близких к нему по частоте.

Высота

Как следует из главы 12, высота тона – это субъективный психологический параметр слуха, определяющий то, насколько высоким или низким он кажется слушателю. Высота тона преимущественно зависит от частоты, но не только от нее. Как правило, высокочастотные звуки воспринимаются как высокие, а низкочастотные – как низкие. Однако между частотой звука и его высотой нет простой линейной зависимости.

Шкала количественной оценки высоты звуков (мел). Связь между высотой звука и его частотой была определена с помощью внесистемной единицы высоты звука, названной **мел**, и специального психофизического метода шкалирования, известного под названием *метода фракционирования* (Stevens & Volkmann, 1940). По определению неким стандартом ощущения высоты звука принято ощущение, вызываемое тоном с частотой 1000 Гц и уровнем интенсивности 40 дБ, высоте которого присвоено численное значение 1000 мел. Метод фракционирования, использующий стандарт с частотой 1000 Гц, заключается в следующем. Испытуемому поочередно предъявляют два тона, интенсивность звучания которых постоянна во времени, что же касается частоты этих тонов, то фиксированное значение имеет частота только одного из них. Испытуемый изменяет частоту второго звука до тех пор, пока его высота не будет восприниматься им как равная какой-то части высоты звука с зафиксированной частотой, например его половине. Поскольку высота звука с частотой 1000 Гц равна 1000 мел, частота звука, который кажется наблюдателю в два раза менее высоким, оценивается в 500 мел. Аналогичным образом высота звука, который воспринимается как в два раза более высокий, чем звук с частотой 1000 Гц, оценивается в 2000 мел, а того, который кажется в три раза более высоким, – в 3000 мел. Распространение этой процедуры на другие частоты и экстраполяция результатов приводит к построению шкалы частота – высота, представленной на рис. 13.4 и показывающей, сколько мел соответствуют той или иной частоте. Обратите внимание на то, что единственный тон, для которого численные значения частот и мел равны, – это звук с частотой 1000 Гц (по определению).

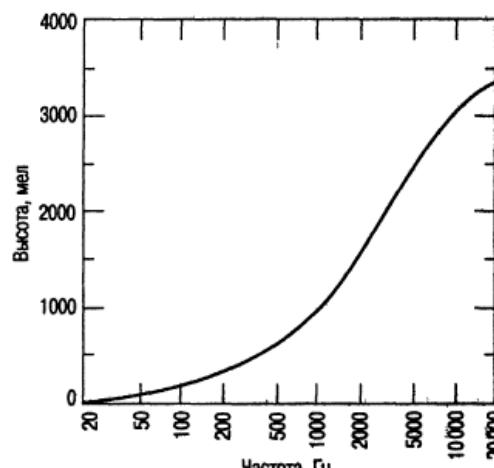


Рис. 13.4. Зависимость высоты тона от его частоты

Высота выражена в мелах, а частота – в герцах. Кривая показывает, как изменение частоты звука влияет на восприятие его высоты. Обратите внимание на неравномерность возрастания высоты тона при увеличении его частоты: в диапазоне частот до 1000 Гц воспринимаемая высота тона растет быстрее, чем для частот более 1000 Гц. Шкала частот – логарифмическая.
(Источник: Stevens & Volkmann, 1940)

Шкала количественной оценки высоты, единицей которой является мел, свидетельствует об отсутствии линейной зависимости между частотой и высотой. Известно, что высота тонов с частотой менее 1000 Гц возрастает быстрее, чем частота, а высота тонов с частотой более 1000 Гц — медленнее, чем частота. Иными словами, для звуков с частотой более 1000 Гц требуется более существенное изменение частоты для того, чтобы изменилась высота, чем для звуков с частотой менее 1000 Гц. Как видно из рис. 13.4, тоны, высота которых равна 500, 2000 и 3000 мел и которые воспринимаются: первый как в два раза менее высокий, второй как в два раза более высокий, а третий как в три раза более высокий, чем стандартный тон с частотой 1000 Гц, имеют частоты, равные примерно 400, 3000 и 10 000 Гц соответственно. (Хотя шкала, единицей которой является мел, и полезна, поскольку позволяет упрощенно выразить взаимосвязь частоты и высоты относительно простых звуков, в музыкальной практике она не очень эффективна.)

Высота и интенсивность

Влияние интенсивности на высоту относительно чистых тонов поддается измерению. Стивенс с помощью одного наблюдателя, прошедшего специальную подготовку, провел ставшее классическим исследование, в котором определил влияние интенсивности на высоту тонов 11 частот в диапазоне от 150 до 12 000 Гц (Stevens, 1935). Он последовательно предъявлял наблюдателю два тона, частоты которых отличались лишь незначительно, и наблюдатель таким образом подбирал интенсивность одного из них, чтобы они воспринимались как равные по высоте. Таким образом, у наблюдателя была возможность компенсировать разницу в частотах. По мере возрастания частоты (для тонов с частотой 3000 Гц и выше) высота тона поддерживалась постоянной за счет снижения его интенсивности. Напротив, по мере возрастания частоты тонов с частотой 500 Гц и ниже их высота поддерживалась на постоянном уровне за счет увеличения интенсивности. Характер зависимости высоты звука от его частоты, выявленный этими разными способами, таков: при увеличении интенсивности высота высокочастотных тонов возрастает, а низкочастотных — снижается. Влияние интенсивности на высоту тонов со средними частотами (в диапазоне 1000–2000 Гц) минимально (см. также Gulick, 1971).

Прежде чем завершить специальное обсуждение громкости и высоты, стоит подчеркнуть различие между физическими и психологическими параметрами аудиального стимула. Важно не путать физические свойства звука — его интенсивность (или амплитуду) и частоту (и сложность) — с такими его психологическими свойствами, как громкость и высота (и тембр). Это совершенно разные характеристики звука. Более того, несмотря на то что между интенсивностью и громкостью, так же как и между частотой и высотой звука, существуют важные зависимости, у нас была возможность убедиться в том, что эти зависимости отнюдь не просты. Например, двукратное увеличение интенсивности не удваивает громкости, а двукратное увеличение частоты не удваивает высоты звука. Далее, как следует из контуров равной громкости (рис. 13.3), изменение частоты звука оказывается не только на его высоте, но, возможно, и на его громкости. Данные о физических и психологических свойствах звука, а также о единицах их измерения обобщены в табл. 13.1.

Таблица 13.1
Физические и сенсорные параметры звука
и единицы их измерения

Физический параметр	Единица измерения	Сенсорный параметр	Единица измерения
Интенсивность, или амплитуда	Децибел (дБ)	Громкость	Сон, фон
Частота	Герц (Гц)	Высота	Мел
Сложность		Тембр	

Влияние продолжительности звучания аудиального стимула на его восприятие

Поскольку преобразование акустической энергии в нервную и возбуждение слухового механизма протекает во времени, можно ожидать, что восприятие аудиального стимула зависит от времени его воздействия. Чтобы распознать качества тона, нужно иметь возможность слышать его в течение какого-то минимального времени. Например, если тон, частота и интенсивность которого в принципе могут быть восприняты человеком, предъявить всего на несколько миллисекунд, он потеряет свои тональные характеристики и либо вообще не будет услышан, либо будет воспринят как щелчок. Чтобы слушатель смог воспринять высоту звука данной частоты как стабильную и узнаваемую, звук должен длиться не менее 250 мс (Gulick et al., 1989). Как правило, мы значительно лучше распознаем тоны и различаем тоны разных частот, когда время их звучания достаточно велико (Dai & Green, 1993).

Продолжительность звучания влияет также и на громкость. Если в результате постепенного уменьшения продолжительность звучания становится менее 200 мс, для поддержания громкости на постоянном уровне нужно увеличивать интенсивность звука. Звуки, длиющиеся менее 200 мс, воспринимаются как менее громкие, чем более продолжительные звуки той же интенсивности. Следовательно, хотя такие сенсорные параметры звука, как высота и громкость, в первую очередь зависят от частоты и интенсивности звуковой волны, вторым по значению фактором, влияющим на них, является продолжительность аудиальной стимуляции. В определенных пределах распознавание громкости и высоты звука возрастает по мере увеличения продолжительности кратковременной стимуляции.

Влияние мультитональной стимуляции Биения

Человек, на которого одновременно воздействуют два звука одинаковой интенсивности, лишь незначительно отличающиеся по частоте, может воспринимать биения. Возможно, лучшее определение биений — восприятие одного пульсирующего тона одной высоты, примерно равной среднему значению высот обоих тонов, но с периодически изменяющейся громкостью, которая то прибывает, то идет на убыль.

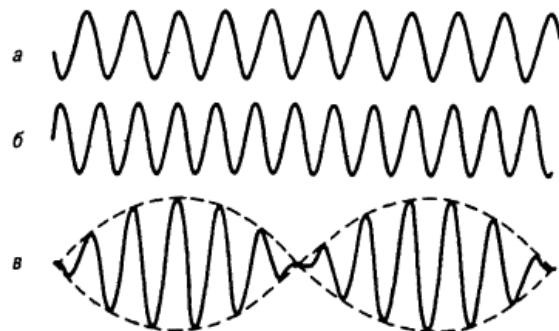


Рис. 13.5. Биения

Представлены две звуковые волны – а и б, принадлежащие двум тонам, причем частота волны б несколько выше. При одновременном звучании двух тонов волны взаимодействуют друг с другом, образуя сложный тон, интенсивность которого изменяется со скоростью, равной разности между частотами двух волн. Фрагменты волны в, очерченные пунктирными линиями, отражают изменение интенсивности, называемое частотой биений. (Источник: M. Mayer. *Sensory perception laboratory manual*. New York: Wiley, 1982, p. 91)

Частота флуктуаций громкости в биении точно соответствует разности частот двух действующих одновременно звуков. Причина возникновения биений чисто физическая и заключается в том, что при наложении двух колебаний с близкими частотами возникают колебания с периодически изменяющейся амплитудой и исходные звуковые волны попеременно то усиливают, то гасят друг друга. Как показано на рис. 13.5, при этом образуется сложный тон, интенсивность которого изменяется со скоростью, равной разности частот двух исходных тонов.

Следовательно, когда одновременно генерируются два тона, частоты которых отличаются, допустим на 2 Гц, их звуковые волны будут синфазны (т. е. будут одновременно достигать компрессии) дважды за 1 с и столько же раз за 1 с будут не в фазе (т. е. пик одной волны будет совпадать с подошвой другой волны). Ухо воспринимает чередование синфазности и расхождения по фазе как периодические изменения громкости, т. е. как *биения*.

По мере увеличения разницы между тонами частота изменений громкости возрастает, и биения начинают сливаться. При достаточно большой разнице в частотах (например, если она равна примерно 30 Гц) результирующий звук приобретает неприятную «шероховатость».

Маскировка

Восприятие звука зависит не только от его собственных частоты и интенсивности, но и от других одновременно присутствующих звуков. Общее правило таково: если одновременно присутствуют два аудиальных стимула, имеющих приблизительно равную частоту, но разные интенсивности, более интенсивный тон понизит или полностью исключит восприятие менее интенсивного тона. Ощущение, которое испытываешь, когда один звук заглушает другой, известно всем. Типичная классная комната заполнена разнообразными звуками: учащиеся двигаются, кашляют, шепчутся, шелестят бумагами, и на фоне всех этих звуков порой трудно расслы-

шать голос учителя. Подобное явление, называемое **маскировкой**, выражается в возрастании порога восприятия одного тона, называемого *тестовым тоном*, вследствие присутствия другого тона, называемого *маской*.

Классическими исследованиями маскировки признаны исследования, выполненные Вигелем и Лейном (Weigel & Lane, 1924); обобщенные результаты более позднего изучения этого явления, проведенного Звикером и Шарфом, представлены на рис. 13.6 (Zwicker & Scharf, 1965).

На рисунке представлены результаты изучения маскировки звуков разной частоты тремя уровнями интенсивности узкого интервала частот, примерно равных 1200 Гц (указан стрелкой над словами «частота маски»). Каждая кривая отражает степень маскировки частотой 1200 Гц с определенной интенсивностью. Маскирующий эффект оценивался на основании повышения порога восприятия интенсивности тестовых тонов, частота которых отложена на абсциссе, в присутствии масок с частотой 1200 Гц и с разными интенсивностями. Как следует из рисунка, в присутствии маски слуховой порог повышается и степень этого повышения зависит от интенсивности и частоты маски, а именно: тестовые тонны, частота которых близка к частоте маски, более подвержены ее влиянию, нежели тестовые тоны, частота которых заметно отличается от ее частоты. Следовательно, чем меньше разница между частотой тестового тона и частотой маски, тем заметнее ее маскирующий эффект. Кроме того, сопоставление результатов, полученных для масок с разными интенсивностями, свидетельствует о том, что увеличение этого параметра также приводит к возрастанию маскирующего эффекта.

Из рисунка очевидна и асимметрия кривых, соответствующих интенсивности 80 и 110 дБ. Это значит, что в отношении разных частот маскирующий эффект проявляется неодинаково.

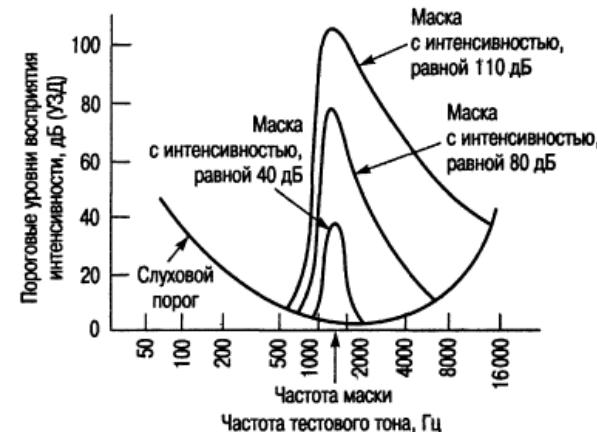


Рис. 13.6. Маскировка

Представлены пороговые уровни восприятия интенсивности в присутствии трех маскирующих стимулов с частотой, приблизительно равной 1200 Гц, и разными интенсивностями. Интенсивности масок в децибелах обозначены цифрами на кривых, расположение которых на рисунке характеризует уровень маскирующего эффекта: чем выше лежит кривая, тем больше маскирующий эффект. Стимулы, интенсивность которых превышает 40 дБ, маскируют тоны, частота которых превышает их собственную частоту; тоны с меньшей частотой ими практически не маскируются. (Zwicker & Scharf, 1965)

ляется по-разному: он сильнее проявляется в отношении тех тестовых тонов, частоты которых превышают частоту маски. Иными словами, низкие частоты более эффективно маскируют высокочастотные стимулы, чем низкочастотные. Даже маска, интенсивность которой равна 110 дБ, лишь незначительно влияет на тестовые тона, частоты которых ниже ее собственной частоты. Одновременно обращает на себя внимание и другой факт: тенденция к асимметрии маскирующего эффекта характерна только для масок, интенсивность которых превышает 40 дБ (УЗД). Действительно, маске, интенсивность которой равна 40 дБ, соответствует практически симметрическая кривая.

Маскировка и активность базилярной мембранны. Гипотеза «занятой линии». Многие особенности маскирующих эффектов очень просто объясняются на основании анализа взаимодействия и интерференции паттернов смещений базилярной мембранны. Подобное объяснение иногда называют гипотезой «занятой линии» (Scharf & Viis, 1986). Суть этой гипотезы заключается в следующем: заглушающая тестовый тон маска возбуждает ту же самую ограниченную группу волокон слухового нерва, предотвращая тем самым их стимуляцию тестовым тоном. Следовательно, маскирующий эффект проявляется тогда, когда нейронные структуры, в обычных условиях стимулируемые данным тоном, оказываются «слишком занятыми» маской, чтобы адекватно отреагировать на него.

В пользу гипотезы «занятой линии» свидетельствуют результаты изучения паттерна смещений базилярной мембранны. Вспомните о существовании на ней пространственной презентации частот (см. рис. 12.15 и 12.20 в главе 12) и обратите внимание на асимметрию ее смещений (рис. 12.20): паттерн смещений базилярной мембранны, создаваемый низкочастотными звуками, относительно широк и охватывает большую часть длины мембранны. Что же касается низкочастотных звуков, то их воздействие приводит к возникновению более четких («острых») паттернов меньшей площади, пики которых лежат ближе к области стремени и овальному окну.

Данные о роли смещения базилярной мембранны в эффекте маскировки обобщены на рис. 13.7.

Как следует из рис. 13.7, а, когда частота и интенсивность маски превышают частоту и интенсивность тестового тона, создаваемый ею паттерн смещений затрагивает лишь часть базилярной мембранны. (Вспомните, что пики волн с большими частотами располагаются ближе к стремени, что применительно к рис. 13.7 означает смещение влево.) Поскольку низкочастотный тестовый тон вызывает смещение другого участка базилярной мембранны, не перекрывающегося с тем, смещение которого вызывает маска, маскирующий эффект последней относительно невелик, тестовый тон различим. Напротив, если частота маски ниже частоты тестового тона с низкой интенсивностью (рис. 13.7, б), смещение базилярной мембранны под воздействием маски имеет тенденцию к перекрыванию («поглощению») смещения, вызываемого тестовым тоном, в результате чего вероятность обнаружения последнего либо снижается, либо вовсе отсутствует. Однако если его тестовый тон значительно интенсивнее маски, создаваемый им паттерн смещения базилярной мембранны отличен от паттерна, созданного маской, и его можно обнаружить (рис. 13.7, в).



Рис. 13.7. Маскировка и смещение базилярной мембранны

а – интенсивность и частота маски выше, чем интенсивность и частота тестового тона. Низкочастотный тестовый тон вызывает смещение той части базилярной мембрани, где отсутствует перекрывание, т. е. далеко от стремени и овального окна. (Вспомните, что высокие частоты вызывают максимальное смещение базилярной мембрани вблизи области стремени и овального окна, т. е. в левой части каждого графика.) Следовательно, «вмешательство» маски не окончательное и тестовый тон воспринимаем.

б – частота маски ниже, а интенсивность выше, чем у тестового тона. В данном случае влияние интерференции паттернов смещений базилярной мембрани под влиянием маски и тестового тона велико и тестовый тон неотличим от маски – в – частота этой маски тоже ниже частоты тестового тона, но интенсивность последнего достаточна велика, благодаря чему он и воспринимается как отдельный звук.

Маскировка одного тона другим возможна не только при их одновременном предъявлении. Эффект интерференции возникает и тогда, когда маска предъявляется перед тестовым тоном (прямая маскировка) и после него (обратная маскировка). Например, при обратной маскировке предъявление более интенсивной маски спустя примерно 50 мс после тестового тона может привести к тому, что он перестанет восприниматься, хотя до этого был слышен. Кроме того, стимулирование одного уха более интенсивным звуком может сделать неслышимым второй, более слабый звук, стимулирующий другое ухо. Этот эффект называется *интерауральной маскировкой*. Полагают, что он центрального происхождения и что источник интерференции, лежащей в основе интерауральной маскировки, располагается на более высоких уровнях аудиальной системы.

Усталость слуха и аудиальная адаптация

Как правило, после устранения тона-маски уровень нормальной пороговой чувствительности, существовавший до маскировки, быстро восстанавливается. Однако это не всегда свидетельствует о прекращении влияния последней.

Усталость слуха и сдвиги порога. После интенсивной и продолжительной маскировки возросший порог чувствительности может сохраняться в течение нескольких часов или даже дней в виде временного понижения слуха, называемого *усталостью слуха*. Следовательно, *усталость слуха* – это временное снижение (притупление) чувствительности к звукам, предъявляемым *непосредственно после* интенсивных звуков. Как и в случае маскировки, при этом наблюдается возрастание порога восприятия таких звуков (или они кажутся менее громкими). Однако маскировка – это временное снижение чувствительности *в ходе* стимуляции другим тоном (или *непосредственно после* нее). Нет ничего удивительного в том, что продолжительность и степень усталости слуха зависят от продолжительности и интенсивности стимулирующего звука.

Мера усталости слуха — возрастание слухового порога — называется **временным сдвигом слухового порога (ВССП)**. Результаты определения слуховых порогов для широкого диапазона частот, полученные сразу же после прекращения интенсивной стимуляции, сравниваются с результатами определений, выполненных до интенсивной стимуляции. Сдвиг слухового порога (для различных частот) является мерой понижения слуха, вызванного его усталостью.

Аудиограмма, представленная на рис. 13.8, характеризует степень понижения слуха как результат усталости слуха вследствие стимуляции **белым шумом** (смесью звуковых волн, диапазон изменения интенсивностей и частот которых очень широк). Аудиограмма, представленная на рис. 13.8, характеризует степень понижения слуха как результат усталости слуха вследствие стимуляции **белым шумом** (смесью звуковых волн, диапазон изменения интенсивностей и частот которых очень широк).

Самая верхняя кривая, соответствующая нулевому понижению слуха, отражает возвращение чувствительности слуха испытуемого на «достимуляционный» уровень; далее следуют кривые, соответствующие временному понижению слуха через определенные периоды после прекращения воздействия шума. Из рисунка следует, что временное понижение слуха вследствие воздействия избыточного шума более всего сказывается на восприятии высоких частот (от 2000 до 6000 Гц).

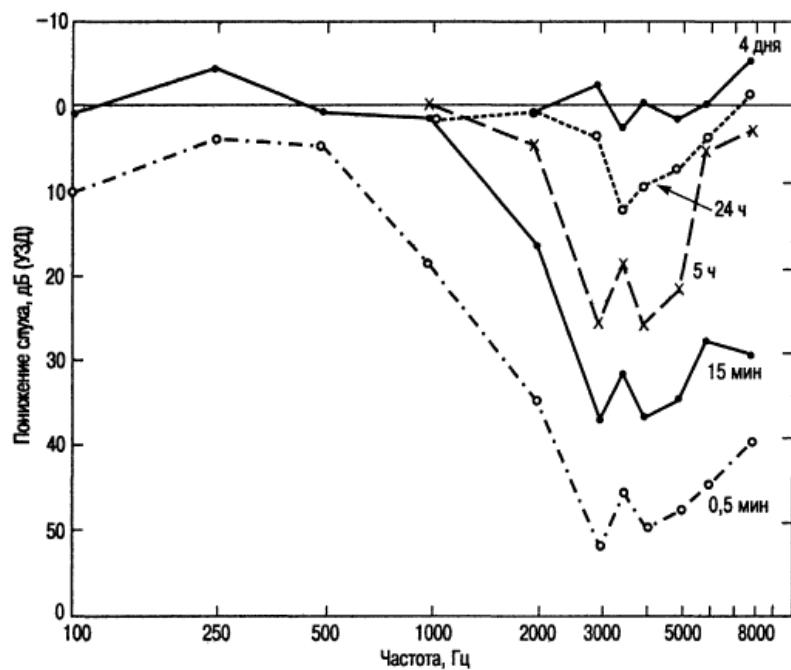


Рис. 13.8. Аудиограмма, показывающая изменения чувствительности слуха к разным частотам в результате стимуляции интенсивным белым шумом (115 дБ) в течение 20 мин

Временный сдвиг порога (временное понижение слуха) определялся через разные промежутки времени после прекращения стимуляции интенсивным белым шумом (т. е. после разных по продолжительности периодов отдыха), и каждому из этих определений соответствует отдельная кривая. Из рисунка следует, что, по мере того как период отдыха увеличивается, чувствительность слуха постепенно приближается к первоначальному уровню и наконец достигает ее (кривая, соответствующая нулевому понижению слуха). Наиболее значительное временное понижение слуха вызывают частоты, лежащие в интервале от 2000 до 6000 Гц. (Источник Postman & Egan, 1949.)

и что по мере увеличения продолжительности периода отдыха чувствительность слуха приближается к «достимуляционному» уровню.

Смещение слухового порога вследствие избыточной аудиальной стимуляции, имеющее необратимый характер, называется **необратимым сдвигом слухового порога (НССП)**. Необратимый сдвиг слухового порога — это такое изменение чувствительности вследствие избыточной аудиальной стимуляции, при котором слуховой порог *никогда* не возвращается к своему «достимуляционному» уровню, а потому представляет собой одну из форм понижения слуха. Хотя НССП может быть результатом и однократного воздействия чрезвычайно интенсивного шума (например, взрыва), и систематического прослушивания очень громкой музыки, как правило, он — следствие многолетнего, постоянного пребывания под воздействием такого шума, источником которого являются некоторые промышленные предприятия. (Вспомните раздел, посвященный снижению слуха вследствие избыточной звуковой стимуляции.)

Аудиальная адаптация. Со сдвигом слухового порога вследствие усталости слуха связано и другое явление, называемое **аудиальной адаптацией** и проявляющееся в том, что воспринимаемая громкость аудиального стимула, предъявляемого в течение продолжительного периода времени, постепенно снижается. Иными словами, долго звучащий тон со временем начинает казаться менее громким. С течением времени продолжающееся звучание, значительно превышающее по интенсивности слуховой порог, начинает казаться менее громким, а те звуки, интенсивность которых близка к пороговой, могут стать неслышимыми. Известно, что результатом 3-минутного непрерывного воздействия звука, интенсивность которого равна 80 дБ, становится понижение чувствительности к нему примерно на 20 дБ (Moore, 1989). Это значит, что спустя три минуты он будет восприниматься как звук с интенсивностью, равной 60 дБ. Аудиальная адаптация — весьма распространённое явление. Она объясняет, почему мы сразу же замечаем внезапную остановку таких постоянно работающих приборов, как холодильники или кондиционеры воздуха: резкое прекращение аудиальной стимуляции обостряет наше восприятие.

Если продолжительное воздействие интенсивного звука снижает чувствительность к громкости, разумно предположить, что длительное воздействие относительно слабого аудиального стимула способствует повышению чувствительности к звукам низкой интенсивности. Увеличение чувствительности вследствие относительной *нехватки* аудиальной стимуляции аналогично темновой адаптации — процессу привыкания к плохому освещению, которая проявляется в том, что пребывание в темноте способствует значительному увеличению чувствительности визуальной системы (см. главу 4). Не исключено, что под воздействием всех аудиальных впечатлений дня чувствительность уха к ночным звукам уменьшается. Следовательно, ночной сон может способствовать восстановлению первоначальной чувствительности, поскольку, когда человек спит, его аудиальная система отдыхает. Этим объясняется, почему утром звук будильника, врывающийся в относительную тишину ночного сна, кажется вам значительно более громким, чем на кануне вечером, когда вы заводили его. Разумеется, равновероятно и другое: звук будильника утром кажется таким пронзительным (и громким) вовсе не потому, что ваш слух оправился от акустической усталости, накопившейся за минувший день, а потому, что вам просто не хочется вставать.

Субъективные свойства тона

Объем и плотность

В литературе по психоакустике упоминаются некоторые субъективные свойства чистых тонов, которые нельзя объяснить только высотой и громкостью последних. Одним из таких субъективных параметров является **объем** — термин, которым характеризуют кажущийся «размер» тона, его обширность, или объемность. Возникновение этого термина основано на представлении о том, что при восприятии некоторых звуков, независимо от их высоты и громкости, создается впечатление, что они занимают больше аурального «пространства», чем другие. (В данном контексте термином «объем» обозначается иное понятие, чем то, которое имеют в виду производители, например, телеаппаратуры, называя кнопки регулировки громкости звука словом «объем». Такое использование термина «объем» неправомочно.) Когда испытуемых просят расположить тоны *в соответствии со шкалой «большой—маленький»*, как правило, в число маленьких, или менее «объемных», преимущественно попадают высокочастотные звуки.

Второй субъективный параметр тона, которым оперируют специалисты по психоакустике, — **плотность**. Этим термином описывается кажущаяся «компактность», или «сжатость» («твердость»), звука, причем высокочастотные звуки воспринимаются как более плотные. Между объемом и плотностью существует обратная зависимость: чем больше объем, тем ниже плотность, и наоборот, однако и объем, и плотность увеличиваются при увеличении интенсивности тона. При значительном увеличении интенсивности низкочастотный тон может сравняться по плотности с высокочастотным (Guirao & Stevens, 1964).

Консонанс и диссонанс

Сочетание двух одновременно звучащих звуков большинством слушателей воспринимается либо как приятное, либо как неприятное. Понятие « приятное для слуха одновременное звучание разных тонов, которые смешиваются, или сливаются, друг с другом, называется консонансом (от латинского *consonans* — созвучие. — Примеч. пер.). Сочетания звуков, которые звучат неслитно и «режут слух», называются диссонансом (от латинского слова *dissonans* — разнозвучащий. — Примеч. пер.). Хотя не исключено, что для восприятия сочетания разных тонов консонанса или диссонанса важны такие факторы неаудиального характера, как привычка, культура и научение, аудиальные процессы также играют в нем определенную роль.

Частотная разница двух звуков — важное акустическое соображение, которое следует иметь в виду при решении вопроса о том, является ли их сочетание консонансом или диссонансом. Одно из объяснений возникновения диссонанса заключается в том, что близкие по частоте верхние гармоники двух фундаментальных частот придают звуку «шероховатость» (причина возникновения подобной «шероховатости» описана в подразделе, посвященном биениям; см. также Terhardt, 1977). Что же касается консонанса, то он возникает тогда, когда частотная разница между гармониками фундаментальных частот достаточно велика, звуки либо воспринимаются по отдельности, либо сливаются и усиливают друг друга.

Музыкальные инструменты — это источник и сложных тонов, содержащих много высокочастотных гармоник, что усиливает впечатление «шероховатости» звучания. А это значит, что сочетание двух тонов, принадлежащих музыкальным инструментам, скорее окажется диссонансом, чем сочетание тех двух тонов, которые можно представить простой синусоидальной волной.

Хотя основные психологические параметры звука, определяющие аудиальное ощущение, — громкость и высота, такие его дополнительные субъективные характеристики, как объем и плотность наряду с диссонансом или консонансом одновременно звучащих звуков, способны значительно обогатить наши слуховые впечатления.

Искусственные/естественные звуки

Выше мы изложили немало важных сведений о психоакустике. Однако большинство из огромного числа исследований звука, которым нельзя отказать ни в информативности, ни в полезности, были выполнены в лабораториях с использованием строго контролируемых тонов, по большей части — чистых тонов относительно длительного звучания, которые совершенно не похожи на те звуки, которые встречаются в природе. Возможно, искусственные звуки отличаются от естественных прежде всего именно своей чистотой и продолжительностью. В природе продолжительно звучащие чистые тона — крайне редкое явление. Как писали Masterton и Даймонд, «большинство естественных звуков и практически все естественные звуки, которые предупреждают животное о появлении потенциально опасного “незваного гостя”, — очень короткие... и представляют собой не продолжительные чистые тона и даже не их простые комбинации, а щелчки, хлопки, треск, стук и глухой шум» (Masterton & Diamond, 1973, p. 419).

Выводы

В этой главе мы описали некоторые качественные и количественные зависимости между физическими параметрами простых звуков и их субъективными психологическими свойствами. Мы отметили, что высота звука в первую очередь зависит от частоты изменений звукового давления, выраженной в герцах (Гц), а его громкость — от амплитуды, или интенсивности, звуковой волны, измеряемой в децибелах (дБ).

Мы рассказали об измерении пороговых уровней интенсивности в диапазоне частот, воспринимаемых человеческим ухом, и пришли к выводу о том, что частотам, приблизительно равным 3000 Гц, соответствует минимальный слуховой порог, а следовательно, человек наиболее чувствителен именно к этим частотам. Мы также рассмотрели вопрос о дифференциальном пороге и отметили, что минимальное изменение интенсивности звука, необходимое для создания перцептивной разницы, составляет от 1 до 2 дБ.

Между интенсивностью звука и его громкостью нет прямой зависимости: громкость возрастает медленнее, чем интенсивность, в связи с чем мы описали численную меру субъективной громкости — сон — и основанную на ней шкалу. Использо-

вание этой шкалы позволило нам убедиться в том, что при трехкратном увеличении интенсивности звука (или ее увеличении на 10 дБ) его громкость удваивается.

Влияние частоты звука на его громкость было проанализировано с помощью контуров равной громкости. В определенных пределах частота звука влияет на его громкость, а именно: при сравнительно низких уровнях интенсивности ухо человека более чувствительно к частотам в диапазоне от 1000 до 4000 Гц, чем к другим частотам воспринимаемого им интервала. С точки зрения громкости это означает, что при равной интенсивности, звуки с частотой, близкой к 3000 Гц, кажутся громче, чем звуки с другими частотами.

Затем мы рассмотрели вопрос о частоте и ее различии. Мы отметили, что дифференциальный порог для частот вплоть до 1000 Гц равен 3 Гц, а отношение Вебера для частот в диапазоне 1000–10 000 Гц постоянно и равно 0,004. Порог различия зависит также и от уровня интенсивности звуков: чем ниже интенсивность, тем выше порог различия. Короче говоря, чем слабее звук, тем труднее идентифицировать его как отличный от других звуков с близкими по значению частотами.

Мы рассказали о единице измерения высоты тона, которая называется мел, и о шкале количественной оценки высоты, основанной на этой единице. Между частотой звука и его высотой нет линейной зависимости: для тонов в диапазоне до 1000 Гц высота тона (при увеличении его частоты) возрастает быстрее, чем для тонов с частотой более 1000 Гц. Кроме того, высота зависит также и от его интенсивности. Известно, что при увеличении интенсивности воспринимаемая высота высоких звуков возрастает, а низких тонов — снижается.

Затем мы рассмотрели некоторые явления и параметры стимулов, влияющие на звуковосприятие. Мы пришли к выводу, что увеличение продолжительности звучания облегчает распознавание тонов и различие тонов разных частот. Мы также рассказали о таком феномене, как слуховые биения, возникающем при одновременном стимулировании двумя разными частотами. Причина возникновения биений — поочередное взаимное усиление и подавление двух звуковых волн. Частота биений сложного тона, который возникает при этом, равна разности частот двух стимулов.

Рассматривая такое явление, как маскировка, заключающееся в том, что присутствие одного тона мешает восприятию другого тона, мы отметили некоторые общие закономерности маскировки: чем интенсивнее маскирующий тон (маска), тем больше маскирующий эффект; эффект маскировки проявляется сильнее в тех случаях, когда частоты маски и маскируемого тона близки по значению, чем когда они заметно отличаются друг от друга; маскирующий эффект интенсивных тонов проявляется сильнее в тех случаях, когда частота маскируемого звука значительно превосходит их собственную частоту, чем когда она меньше ее. Завершая обсуждение маскировки, мы проанализировали это явление исходя из представлений о конкурентном характере смещений базилярной мембранны при стимулировании двумя тонами. Объяснение эффекта маскировки на основании интерференции двух стимуляций на базилярной мембране называется гипотезой «занятой линии».

Завершая главу, мы рассказали об усталости слуха и аудиальной адаптации. Усталостью слуха называется временное снижение чувствительности к звукам, следующим непосредственно за избыточной аудиальной стимуляцией, или возра-

стание порога их восприятия. Возрастание порога слухового восприятия вследствие усталости слуха называется временным сдвигом слухового порога (ВССП). Избыточная аудиальная стимуляция может стать и причиной необратимого сдвига слухового порога (НССП). Аудиальной адаптацией называется снижение чувствительности к какому-либо звуку, наступающая после продолжительной стимуляции им. На практике это означает, что воспринимаемая громкость физически неизменного звука с течением времени уменьшается.

В последнем подразделе мы кратко описали четыре субъективных параметра тона — объем, плотность, консонанс и диссонанс.

Ключевые слова

Аудиальная адаптация

Мел

Биения

Необратимый сдвиг слухового порога
(НССП)

Временный сдвиг слухового порога
(ВССП)

Объем

Гипотеза «занятой линии»

Плотность

Диссонанс

Сон

Консонанс

Усталость слуха

Контуры равной громкости

Фон

Маскировка

Вопросы для проверки усвоения материала

- Как изменение частоты влияет на определение абсолютного порога восприятия интенсивности? К какому диапазону интенсивностей наиболее чувствительна аудиальная система человека?
- Опишите количественную зависимость между физической интенсивностью звука и его воспринимаемой громкостью. Используя шкалу, основанную на единице субъективной громкости — соне, расскажите о том, в какой мере громкость звука зависит от уровня его интенсивности.
- Что такое контуры равной громкости? Единицей чего является фон? О какой зависимости между частотой тона и его громкостью свидетельствуют контуры равной громкости и фон?
- Используя шкалу количественной оценки высоты тона, основанную на единице, называемой мелом, расскажите о зависимости между частотой и высотой тона. Как интенсивность тона влияет на его высоту?
- Обобщите информацию о различии частоты и интенсивности. Каковы дифференциальные порог интенсивности и частоты?
- Каким общим закономерностям подчиняются зависимости высоты и громкости тона от продолжительности его звучания?
- Что такое биения? Объясните их возникновение вследствие того, что две звуковые волны отличаются и по частоте, и по фазе.

8. Расскажите об аудиальной маскировке и перечислите условия, при которых возникает это явление. Каким общим закономерностям подчиняется связь между звуком-маской и теми звуками, которые он маскирует? Известно, что высокинтенсивный тон эффективнее маскирует звуки более высокие, чем он сам, нежели те, которые ниже, чем он. Объясните это явление.
9. Воспользовавшись гипотезой «занятой линии», объясните феномен маскировки на основе анализа интерференции звуковых волн на базилярной мембране.
10. Что является причиной усталости слуха и аудиальной адаптации? Как они влияют на слуховой порог? Чем отличаются друг от друга аудиальная маскировка, усталость слуха и аудиальная адаптация?
11. Расскажите о таких субъективных характеристиках звука, как объем и плотность. Как частота звука и его интенсивность влияют на них? Что такое консонанс и диссонанс? От чего зависит восприятие сочетания тонов как консонанса или как диссонанса? Какова роль частоты в возникновении консонанса и диссонанса?

ГЛАВА 14

Паттерн аудиального восприятия: звук как источник информации

В этой главе мы рассмотрим восприятие значимой (имеющей смысл) информации, содержащейся в звуке. Информации, которая содержится в звуках, существующих в природе, достаточно для определения как положения в пространстве их источников, так и характера последних. Более того, благодаря вокализации и восприятию звуков многим биологическим видам доступна важная форма коммуникации. Что же касается человека, то именно восприятию звуков, несущих в себе определенную информацию, мы обязаны двумя своими уникальными навыками: способностью воспринимать музыку и способностью воспринимать речь – вокально-аудиальному поведению, которое как качественно, так и количественно значительно превосходит звуковую коммуникацию других биологических видов.

В этой главе, завершающей рассказ о слухе и аудиальной системе, мы расскажем о механизмах звуковосприятия, обратив основное внимание на то, каким образом они способствуют восприятию звука как источника информации, а именно на аудиальное восприятие пространства и локализацию источников звуков, на восприятие музыки и на звуковую коммуникацию между животными, и в первую очередь – на восприятие человеческой речи. Начнем же мы с обсуждения вопроса о том, что имеет непосредственное отношение к механизму звуковосприятия, – с нейронных связей между ухом и мозгом, обеспечивающих извлечение из звуков заключенной в них информации.

Проводящий путь слухового анализатора и центральные структуры

В двух предыдущих главах мы описали только один структурный элемент аудиальной системы – ухо. Однако одно ухо – это только половина звуковоспринимающего аппарата. Как уже было сказано выше, когда речь шла о двух глазах, два уха – это не просто дублирование определенного органа. В действительности уши функционируют не независимо друг от друга; скорее можно говорить как об их нейронном, так и поведенческом взаимодействии. Понимание этого взаимодей-

ствия — ключ к пониманию функциональных последствий воздействия звука, которым преимущественно и посвящена данная глава. В соответствии с этим в данном разделе мы вновь обратимся к некоторым физиологическим аспектам слуха, речь о которых шла в главе 12. Однако нейронные структуры, механизмы и связи, описанные в нем, имеют непосредственное отношение к совершенно конкретным функциям: к локализации звука и коммуникации.

Принципиальная схема нейронных связей между ухом и мозгом представлена на рис. 14.1. Волокна слухового нерва, выходящие из внутреннего уха, образуют ряд синаптических связей с различными ядрами, лежащими на пути слухового нерва в

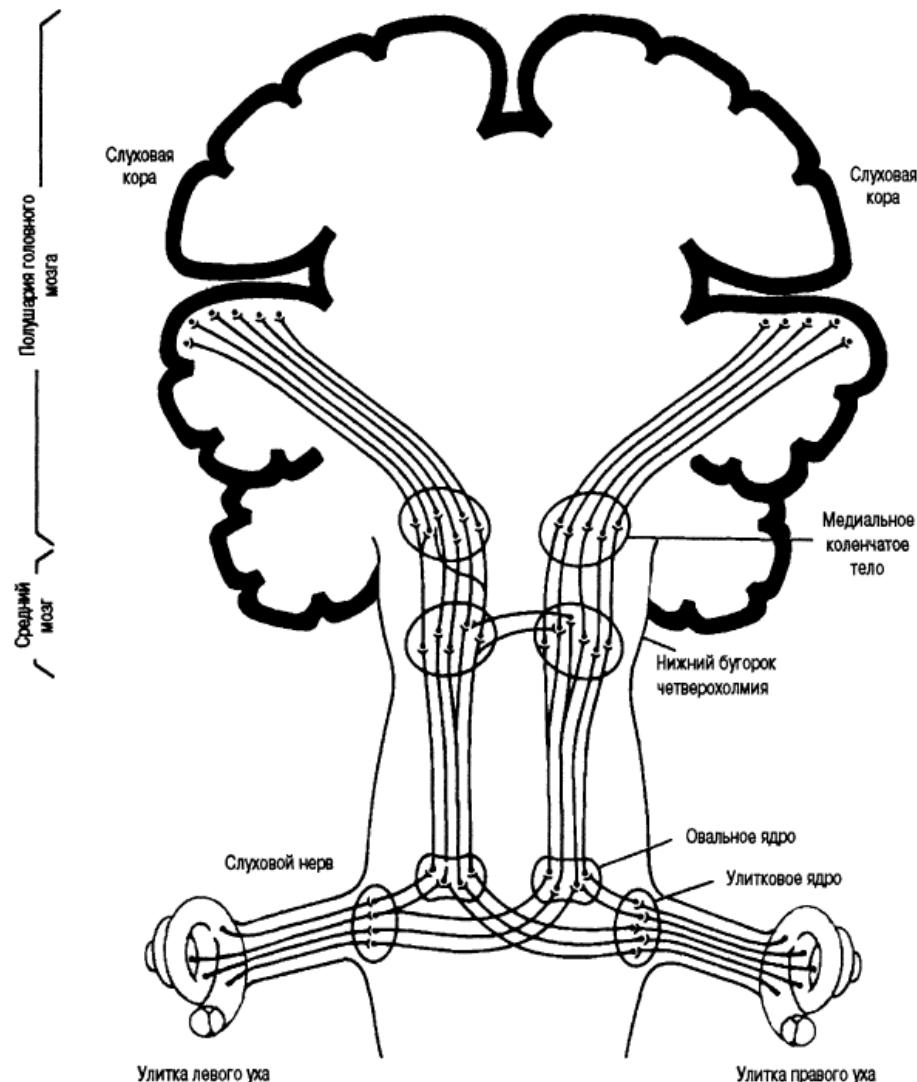


Рис. 14.1. Схематическое изображение нейронных связей обеих улиток со слуховой корой

кору головного мозга. Первой нейронной структурой, с которой слуховой нерв встречается по выходе из внутреннего уха, является *улитковое ядро*, лежащее в основании заднего мозга. Нервные волокна, выходящие из улиткового ядра, распределяются по нескольким направлениям. Каждое улитковое ядро направляет часть своих волокон слухового нерва к *овальному ядру*, называемому также *верхней оливой*, расположенному в том же полушарии мозга (или *ипсолатерально*), однако большинство волокон улиткового ядра направляются к овальному ядру, расположенному в противоположном полушарии мозга, т. е. *контрлатерально*. Таким образом, большая часть нервных волокон из каждого уха (около 60 %) оказывается в противоположном полушарии мозга. Преимущественно контрлатеральная организация связи нейронных элементов одной половины тела, т. е. связь с противоположным полушарием мозга, характерна для большинства нейронных систем. Поскольку в овальном ядре встречаются нервные волокна, исходящие из обеих улиток, оно может сравнивать различные аспекты *бинауральной стимуляции*, т. е. стимуляции обеих улиток. Как станет ясно из дальнейшего изложения, в результате обработки аудиальной системой бинауральной стимуляции выявляется различие в нейронных сигналах, поступающих от обеих улиток, которое является важным источником информации о локализации звука.

Каждое овальное ядро, принимающее нейронные импульсы от обеих улиток, направляет свой бинауральный нейронный сигнал *нижнему холмiku (буторку) четверохолмия*, где нервные волокна снова перекрещиваются, в результате чего каждый нижний холмик четверохолмия получает аудиальные сигналы от обеих улиток, что является гарантией представительства стимуляции обеих улиток в нейронных трактах обоих полушарий мозга. Нейронные сигналы от каждого из нижних бугорков четверохолмия поступают в *медиальное коленчатое тело* — важную сенсорную структуру таламуса, а затем проецируются в *слуховую кору головного мозга*, расположенную в височной доле каждого полушария. (На рис. 14.1 это не показано, но некоторые нейроны каждого медиального коленчатого тела связаны также и с верхним бугорком четверохолмия, который, как уже отмечалось в главе 3, играет роль интегратора аудиальной и визуальной информации, относящейся к локализации объектов.) Поскольку на овальном ядре и на нижнем бугорке четверохолмия происходит перекрещивание нервных волокон, большинство кортикальных нейронов слуховой коры получают сигналы от обеих улиток. Следовательно, аудиальный сигнал, возникающий в обоих кортиевых органах, передается в слуховую кору каждого полушария последовательностью синаптических связей.

Между пространственным расположением нейронов в слуховой коре и частотами звуков, к которым они чувствительны, существует совершенно определенная связь: нейроны, чувствительные к близким по значению частотам, располагаются в непосредственной близости друг от друга. Пространственное расположение частот, характерное для слуховой коры, называется *тонотопической организацией* (см. главу 12). Иными словами, «тонотопической» называется такая организация аудиальной системы, в соответствии с которой нейронные элементы, чувствительные к аналогичным частотам, располагаются рядом.

Теперь мы переходим к рассмотрению функциональной релевантности некоторых структурных связей слухового нейронного тракта. В первую очередь мы рас-

смотрим, как организована передача нейронного возбуждения от уха к мозгу, а затем — то, каким образом эта нейронная трансмиссия обеспечивает пространственную локализацию звука.

Контролирующая роль мозга и слух

Функционирование слуховой коры в первую очередь определяется перекрещающимися нервыми волокнами: перекрещающиеся нейронные тракты быстрее передают нейронные сигналы, а сами эти сигналы более интенсивны, нежели сигналы, передаваемые неперекрещающимися трактами. Следовательно, каждое ухо лучше представлено в противоположном полушарии мозга, т. е. звук, воспринятый, например, левым ухом, вызывает большую нейронную активность слуховой коры правого полушария (Rosenzweig, 1961).

Между слуховыми нейронными трактами существует еще одно отличие: функциональное значение левого и правого полушарий различно (Banich & Heller, 1998; Springer & Deutsch, 1993; Witelson, 1985). Более конкретно эта мысль может быть выражена следующим образом: активность, с которой слуховая кора и правого, и левого полушария обрабатывает и воспринимает информацию о разных свойствах звука, различна. Однако это не означает, что эти различия носят эксклюзивный характер, т. е. что обработка и восприятие какой-то определенной информации доступна лишь определенному участку слуховой коры какого-то одного полушария. Скорее следует согласиться с теми, кто полагает, что полушария функционально координируют свою «работу» и таким образом дополняют друг друга (Banich, 1998; Beeman & Chiarello, 1998). В общем виде подобная функциональная специализация в обработке аудиальной информации называется **контролирующей ролью мозга** (а также *латерализацией функции*, или *церебральной (мозговой) асимметрией*).

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что слуховая кора левого полушария доминирует в аналитической обработке взаимосвязанных аудиальных стимулов, например в обработке и в восприятии информации, содержащейся в речи, и стимуляции, связанной с языком. Слуховая кора правого полушария доминирует в холистической и интегративной обработке пространственной информации и в ее восприятии, а также в восприятии некоторых невербальных звуков, включая музыку. Эти различия обнаружены в результате исследований, выполненных с применением таких методов визуализации работы мозга, как ФМРТ и ПЭТ, которые позволяют идентифицировать активные участки мозга (Zatorre et al., 1992). Существование функциональных различий между полушариями подтверждается также и многими исследователями, проводившими поведенческое тестирование и выявившими попутно некоторые связанные с этими различиями явления. Ниже будет описан специальный поведенческий тест, **дихотическое слушание**, назначение которого — доказательство существования контролирующей роли мозга (мозговой асимметрии).

Дихотическое слушание. Функциональное различие между слуховой корой левого и правого полушарий проявляется при проведении специальной аудиальной процедуры, называемой **дихотическим слушанием**. (Стимуляция обоих ушей разными стимулами называется *дихотической стимуляцией*.) Испытуемый через

два не связанных друг с другом наушника одновременно воспринимает разную информацию. Хотя подобные эксперименты, как правило, требуют специальной аудиотехники, приведенное ниже экспериментальное подтверждение описывает типичный пример дихотического слушания и представляет собой легко воспроизводимую ситуацию, при которой требуется распределение внимания.

Экспериментальное подтверждение

Дихотическое слушание

Способ одновременного стимулирования двух ушей разными стимулами заключается в следующем. Вам понадобятся три стула и два включенных радиоприемника. Составьте стулья в ряд. Сядьте на средний стул, а слева и справа от себя поставьте радиоприемники, настроенные на разные станции, но на одинаковую громкость. Желательно, чтобы обе передачи были «разговорными», — это идеальный вариант. Сидя между двумя радиоприемниками, слушайте одновременно обе передачи. Спустя примерно 60 с запишите то, что сможете вспомнить. Как правило, одна информация «вытесняется» другой, но нередки также случаи, когда «включается» то одна информация, то другая.

Если у вас нет двух радиоприемников или если вы не можете одновременно настроить их на «разговорные» передачи одинаковой громкости, попросите своих друзей сесть по обе стороны от вас, лицом к вам (т. е. один из них смотрит на ваше левое ухо, а второй — на правое) и читать одновременно два разных текста. Если оба текста будут читаться с одинаковой скоростью и одинаково громко, а также окажутся одинаково интересными (или неинтересными) для вас, вы испытаете именно то, что называется дихотическим (дихотомическим) слушанием. Слушайте тексты в течение примерно 60 с, а затем попытайтесь вспомнить, о чем вам читали. Немного подумав, вы сможете создать некую комбинацию из двух тестов, услышанных левым и правым ушами, а который из этих текстов будет преобладать в ней, зависит от того, насколько знакомым и интересным для вас было их содержание, насколько быстро они были прочитаны и т. д.

В одном из ранних исследований с использованием дихотического слушания испытуемым одновременно называли два простых числа — левому и правому уху разные. Когда испытуемых потом спрашивали, что они слышали, выяснилось, что большинство из них лучше запомнили числа, которые они слышали правым ухом (и информация о которых обрабатывалась слуховой корой левого полушария), чем те, которые воспринимались левым ухом (Kimura, 1961). Эти данные, а именно то, что правое ухо и левое полушарие доминируют в обработке информации лингвистического характера, в дальнейшем получили подтверждение, и изучение этого явления было продолжено (см. обзоры Bradshaw & Nettleton, 1983; Springer & Deutsch, 1985, 1993).

Даже когда испытуемым предъявляются такие напоминающие речь звуки, как те, что слышны при обратной прокрутке магнитофонной записи речи, звуки, воспринимаемые правым ухом, идентифицируются правильнее, чем звуки, достигающие левого уха (Kimura & Folb, 1968; см. также Bert & Avery, 1999). Что же касается стимулирования музыкой (пассажей, исполняемых солирующими музыкальными инструментами), то наблюдается обратное явление: мелодии, воспринятые левым ухом, запоминаются лучше, чем аналогичный музыкальный стимул, адресованный правому уху (Johnson & Kozma, 1977; Kimura, 1964, 1967). То же самое относится

к аккордам и к отдельным нотам, извлекаемым из музыкальных инструментов (Siddis & Bryden, 1978), и к чистым тонам (Spreeen et al., 1970). Кроме того, аудиальная система быстрее реагирует на музыкальную стимуляцию в том случае, если стимулируется левое ухо (Kallman & Corballis, 1975).

Левое ухо (правое полушарие) доминирует в восприятии таких невербальных звуков, присущих окружающей нас обстановке, как телефонные звонки, собачий лай и тиканье часов (Curry, 1967; Knox & Kimura, 1970). Более того, доминирующую роль левого уха проявляется и в восприятии невербальной вокализации, т. е. криков, вздохов и смеха (Carmon & Nachson, 1973). Итак, в восприятии вербальных стимулов доминирует правое ухо, имеющее более эффективную нейронную связь с левым полушарием, а в восприятии невербальных стимулов, включая и музыку, доминирующую роль принадлежит левому уху (правому полушарию). Функциональное различие полушарий проявляется уже на ранних стадиях развития мозга. Известно, что в обработке вербальной информации младенцами ведущая роль принадлежит левому полушарию (MacKain et al., 1983).

Интересно отметить, что у глухих специализация левого полушария на обработке лингвистической информации проявляется отчетливее, когда эта информация сообщается языком жестов или жестикуляцией, чем когда она сообщается вербально: глухие при сурдопереводе пользуются правой рукой чаще, чем левой (Corina et al., 1992). (Правая рука контролируется преимущественно левым полушарием.) Когда же глухие люди выполняют некоторые движения нелингвистического характера, требующие известных навыков, или прибегают к определенным символическим жестам (например, машут руками на прощание), никакой доминирующей роли правой руки (левого полушария) не наблюдается. С помощью таких методов визуализации работы мозга, как ФМРТ и ПЭТ, была доказана повышенная нейронная активность слуховой зоны височной доли глухих от рождения людей во время восприятия ими языка жестов (Nishimura et al., 1999). Это значит, что определенный участок мозга, который обычно функционирует как зона обработки аудиальной информации, обрабатывает и информацию, переданную не вербально, а с помощью языка жестов.

Все изложенное выше вовсе не означает, что доминирующая роль левого полушария в обработке вербальной информации — следствие его эволюции под влиянием каких-либо отличительных особенностей вербальной стимуляции как таковой. Точно так же и доминирующая роль правого полушария в обработке музыкальной стимуляции или пространственной информации никак не связана с особенностями последних. Более вероятно иное. Скорее всего, этот феномен свидетельствует о том, что в специализации полушария (или в его доминировании) критическую роль играет некий уровень аналитичности, присущий обработке вербальных или связанных с языком стимулов. Баних и Хеллер отмечали:

Дело не в том, что левое полушарие обрабатывает вербальную информацию, а правое — пространственную [и музыкальную]. Скорее всего, левое полушарие концептуально лучше приспособлено для специализации в обработке такой информации, которая требует постепенности, последовательности и аналитичности, что оказалось вполне подходящим для обработки вербальной информации, а правое полушарие

концептуально лучше приспособлено для холистической и интегративной обработки информации, что как нельзя лучше соответствует требованиям, предъявляемым пространственной информацией [и музыкой] (Banich & Heller, 1998, p. 1).

Это наблюдение подтверждается результатами исследований, авторы которых сообщают о том, что искушенные любители музыки и музыканты-профессионалы лучше узнают простые мелодии, если слушают их правым ухом (при этом доминирующую роль в восприятии играет левое полушарие) (Bever & Chiarello, 1974; Kellar & Bever, 1980; Schlaug et al., 1995). Неподготовленные слушатели ведут себя иначе. (Вспомните, что выше мы говорили о том, что, как правило, музыка лучше воспринимается, когда ее слушают левым ухом, т. е. когда доминирующую роль играет правое полушарие.) Бивер и Чиарелло высказали предположение, суть которого заключается в том, что опытные любители и музыканты-профессионалы слушают музыку иначе, чем непрофессионалы: они анализируют информацию, которую несет в себе мелодия, так, как обычно анализируют речь. Иными словами, они «умеют воспринимать мелодию скорее как ряд артикулированных связей между отдельными компонентами, чем как единое целое» (p. 538).

Следовательно, в том, что доминирующую роль играет то левое, то правое полушарие, проявляется не различие в обработке вербальной и невербальной информации как таковых, а различие между аналитической, последовательной обработкой, которая необходима для восприятия вербального стимулирования, и холистической, интегративной обработкой.

Структурно-функциональные связи, характерные для полушарий головного мозга, иллюстрируются историей болезни французского композитора Мориса Равеля (1875–1937), автора знаменитых симфонических произведений «Испанская рапсодия» и «Болero». В возрасте 56 лет, находясь на пике своей карьеры, композитор перенес тяжелую травму левого полушария головного мозга (Alajouanine, 1948). Несмотря на то что у него сохранился слух, Равель после травмы мог узнавать и оценивать музыку только как неопытный слушатель. Большинство его сложных аналитических музыкальных навыков оказались утраченными, и он перестал быть музыкантом-профессионалом. Он утратил способность пользоваться нотным письмом, играть на рояле и даже петь в тон.

В следующем подразделе мы продолжим обсуждение проводящих путей слухового анализатора и расскажем о главном функциональном достижении эволюции аудиальной системы и слуха — о способности к локализации звуков, или к аудиальному восприятию пространства.

Слуховое пространственное восприятие

Способность к пространственной локализации звуков жизненно важна и для животных, и для человека. Благодаря ей становится возможным определить местоположение источника звука и избежать столкновения с ним; кроме того, она также направляет визуальное внимание. Чтобы точно определить положение источника звука в пространстве, нужно определить как его *направление*, так и его *удаленность*. Источниками этой информации являются *моноуральные* (т. е. воспринимаемые одним ухом) и *бинауральные* (воспринимаемые обоими ушами) признаки.

Монауральные признаки

Восприятие звукового стимула только одним ухом, т. е. на основании **монауральных признаков**, может быть полезно для приблизительной оценки удаленности, однако известно что с помощью монаурального слуха возможна и некаяrudиментарная форма локализации звука (Oldfield & Parker, 1986; Slattery & Middlebrooks, 1994). При решении вопроса об удаленности источника звука важным признаком является интенсивность, или громкость, звуковой волны, достигающей уха. Чем громче звук, тем его источник кажется ближе. Если одновременно слышны два звука, то более громкий обычно воспринимается как менее удаленный. Если громкость одиночного звука постепенно изменяется, то изменяется и восприятие его удаленности. Неподвижный наблюдатель воспринимает затихающий звук как удаляющийся, а тот звук, громкость которого возрастает, — как приближающийся. Все знают, что изменения громкости сирены специального транспортного средства — признак удаленности последнего.

Несмотря на то что физическое изменение интенсивности приближающегося или удаляющегося сложного аудиального стимула с точки зрения оценки удаленности движущегося источника звука и информативно, оно определяется не только удаленностью источника звука от наблюдателя. Интересно, что оценка удаленности движущегося источника звука от неподвижного наблюдателя зависит от того, приближается источник звука к наблюдателю или удаляется от него (Neuhoff, 1998). Изменение громкости приближающегося звука кажется наблюдателю большим по сравнению с аналогичным по величине изменением громкости удаляющегося звука. Иными словами, сложный звук, издаваемый приближающимся объектом, кажется наблюдателю более громким, чем аналогичный по громкости звук, издаваемый удаляющимся объектом. Несмотря на то что в обоих случаях физические изменения интенсивностей равны по величине (но противоположны по направлению), существует зависящая от направления движения источника звука асимметрия в восприятии возрастающей громкости (приближающегося звука) и уменьшающейся громкости (удаляющегося звука). По данным Нейхоффа, не только изменение интенсивности приближающегося звука кажется более значительным, чем изменение интенсивности удаляющегося звука, но при увеличении интенсивности звука асимметрия восприятия возрастает. Эти результаты свидетельствуют о том, что громкие звуки (т. е. менее удаленные) имеют большее перцептивное значение, чем слабые.

С точки зрения жизни в реальном мире предпочтительное восприятие приближающихся звуков (сравнительно с восприятием удаляющихся звуков) весьма полезно, так как может обеспечить индивидуум экологическим, адаптивным преимуществом, поскольку приближающийся источник звука способен нести в себе жизненно важную, биологически релевантную информацию об окружающей среде, например он может сигнализировать о потенциальной опасности, которую таит в себе надвигающийся контакт или столкновение с движущимся источником звука. В отличие от усиливающихся звуков ослабевающие звуки, источниками которых являются удаляющиеся объекты, как правило, несут в себе не столь важную информацию. Нейхофф так охарактеризовал адаптивное значение переоценки громкости усиливающегося, или приближающегося, звука: «Предпочтительная реакция на

увеличивающуюся интенсивность гармонических [сложных] тонов может обеспечить организм преимуществом, которое заключается в подготовке к контакту с источником звука или в увеличении запаса “прочности” при его приближении» (Neuhoff, 1998, p. 123). Следовательно, тенденция переоценивать усиливающиеся (приближающиеся) звуки отражает тот факт, что они имеют большее биологическое значение, чем затихающие (удаляющиеся) звуки.

Эффект Доплера. Другой признак изменения расстояния между неподвижным наблюдателем и движущимся источником звука является — частоты (и высоты) последнего. Возможно, вы сами обращали внимание на то, как изменяется звук сирены специального транспортного средства, проносящегося мимо вас. Это явление называется **эффектом Доплера** — по имени австрийского физика Иоганна Кристиана Доплера (1803–1853), который первым описал его в 1842 г. Эффект Доплера основан на том, что воспринимаемая частота звуковой волны зависит от скорости движения источника звука, а именно при движении источника звука частота каждой последующей звуковой волны несколько выше частоты предыдущей волны. В отличие от стационарного источника звука движущийся источник звука создает волны, которые хотя и распространяются во все стороны с постоянной скоростью, не имеют общего центра. Они имеют тенденцию к опережению («обгону») движущегося источника звука, в результате чего расстояние между следующими друг за другом волнами сокращается, и увеличивается частота звука. Перцептивный результат этого явления таков: с увеличением частоты звуковых волн, проходящих через данную точку, воспринимаемая в этой точке *высота* звука возрастает. После прохождения источника звука мимо неподвижного наблюдателя возникает обратная картина, а именно расстояние между волнами увеличивается, частота уменьшается, и звук воспринимается наблюдателем как более низкий. Подробнее эффект Доплера и влияющие на него параметры описаны в работе (Neuhoff & McBeath, 1996).

Особый интерес представляет эффект Доплера, возникающий в ситуации, когда источник звука движется со сверхзвуковой скоростью. Когда такой источник звука, как реактивный самолет, летит со скоростью, превышающей скорость звука, возникает гул, который слышен на достаточно большом расстоянии.

Бинауральные признаки

Хотя информация об относительном удалении источника звука может быть получена и монаурально, монауральный слух значительно снижает способность к восприятию *направления* звука, особенно если этот звук очень непродолжителен или слаб. Для неподвижного наблюдателя, воспринимающего звук только одним ухом, положение его источника в разных точках пространства равновероятно. Но если звук повторяется или звучит достаточно долго, наблюдатель, воспринимающий его одним ухом, может локализовать его источник с помощью движений головы. Поворачивая голову в ту сторону, откуда раздается звук, и в противоположную сторону, слушатель получает определенный паттерн изменений громкости, который помогает определить местоположение источника звука. Иными словами, когда единственное функционирующее ухо приближается к источнику звука, последний кажется громче, когда же ухо удаляется от него, звук кажется слабее.

Наиболее эффективная и надежная локализация источника звука требует стимуляции обоих ушей и определяется **бинауральными признаками**. Речь идет об использовании аудиальной системой физического различия в стимуляции, возникающего благодаря тому, что уши находятся в разных точках пространства. По сути, это можно назвать сравнением звуков, получаемых от одного источника и стимулирующих оба уха.

Различие во времени. Информации, получаемой слушателем в результате бинауральной стимуляции, присущи некоторые признаки, благоприятствующие локализации звука. Один из этих признаков, называемый **интерауральным различием во времени**, — небольшая разница во времени, возникающая вследствие того, что звук, особенно такой резкий, как щелчок, достигает одного уха раньше, чем другого. Иными словами, этим термином обозначается разница во времени поступления звука в левое и правое ухо слушателя.

Как следует из рис. 14.2, любой звук, издаваемый источником звука *B*, равнодушен от обоих ушей слушателя, вследствие чего одинаково воздействует на них, и интерауральное различие во времени равно нулю. (Подобная стимуляция называется *дихотической*.) В отличие от звуков, издаваемых источником *B*, звуки, издаваемые латерально смещенным источником *A*, чтобы достичь правого уха, должны проделать более длинный путь, нежели тот, который отделяет их от левого уха. Следовательно, звуковые волны достигнут правого уха несколько позднее, чем левого. Общий принцип дихотической стимуляции таков: источник звука, расстояние от которого до одного уха меньше, чем до второго, посыпает звуковые волны,

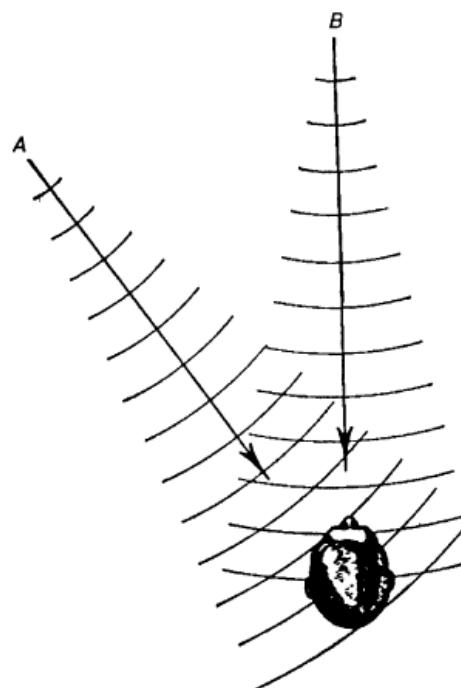


Рис. 14.2. Бинауральные признаки локализации звука
Звуковые волны, посыпаемые источником звука *B*, расположенным прямо перед слушателем, одинаково стимулируют и правое и левое ухо. Звуковые волны, посыпаемые источником *A*, достигают левого уха раньше, чем правого, и воспринимаются им как несколько более интенсивные, поскольку правое ухо слегка «экранировано» головой

которые достигают более близко расположенного уха раньше, чем более удаленного. Различие между временем прихода звука в левое и правое ухо может быть ничтожно мало, но его, как правило, достаточно для локализации звучащего объекта (Wallach, Newman & Rosenzweig, 1949).

Различия во времени поступления звука в левое и в правое ухо, равного всего 0,0001 с или менее, достаточно для того, чтобы оно (при одинаковой интенсивности звуков) могло стать признаком для пространственной локализации звука. В основе этого явления, скорее всего, лежит нервный механизм¹, поскольку это различие во времени слишком мало для того, чтобы два индивидуальных звука были сознательно восприняты как два разных стимула (Rosenzweig, 1961).

Серия экспериментов, проведенных Розенцвейгом (Rosenzweig, 1951, 1954, 1961; см. также Yin et al., 1984), подтверждает предположение о том, что локализация звука на основании интераурального различия во времени имеет нервную основу. Используя в качестве подопытных животных кошек (под анестезией), он показал, что незначительного интераурального различия во времени достаточно для того, чтобы различие между нервными реакциями правого и левого полушарий мозга было достаточно надежным. В качестве источников независимых звуковых сигналов использовались наушники, которые надевали на оба уха подопытного животного. Тончайшие электроды, введенные в слуховую кору, регистрировали нейронный эффект звуковых стимулов. Несмотря на то что электрические сигналы возникали в обоих полушариях, когда стимулировалось только правое ухо, нейронная реакция левого полушария была значительно сильнее. Когда стимулировались оба уха и межстимульный интервал (время между двумя стимулами-щелчками) был мал, результирующая нервная реакция слуховой коры напоминала реакцию на единичный стимул. Так, когда интервал между щелчками, стимулировавшими левое и правое ухо, был равен 0,0002 с, амплитуда кортикальной реакции на первую стимуляцию была несколько больше амплитуды реакции на вторую стимуляцию. Как уже отмечалось выше, объяснение этого явления заключается в том, что каждое ухо в большей степени связано с противоположным полушарием головного мозга. Следовательно, если звук сначала стимулирует левое ухо, а потом — правое, он вызывает большую нейронную активность в правом полушарии (и, как свидетельствуют результаты экспериментов, частично тормозит нейронную реакцию на стимуляцию правого уха). Таким образом, паттерн нейронной активности отражает временнное различие стимуляций.

И наконец, результаты некоторых исследований позволяют предположить, что локализация звука основана на временном паттерне возникновения потенциалов действия особых нейронов слуховой коры. Изучена активность нескольких «кодирующих локализацию» нейронов слуховой коры кошек (под анестезией) в то время, когда источник звука двигался над их головами, описывая окружность (Middlebrooks et al., 1994). По данным авторов этой работы, паттерн возникновения потенциалов действия в отдельных нейронах зависел от местоположения источ-

¹ В данном контексте и далее под термином «нервный» подразумевается механизм, относящийся к нервной системе. — Примеч. науч. ред.

ника звука. Иными словами, можно предположить, что определенные кортикальные нейроны с помощью временных паттернов возникновения потенциалов действия кодируют информацию об определенных пространственных направлениях и локализациях, создавая тем самым своего рода карту пространственного слуха.

Хотя эти результаты еще и не позволяют сделать окончательного вывода, они, без сомнения, подчеркивают роль времени прибытия звука в нейронных процес сах, лежащих в основе его локализации. Поскольку звуки возникают не только в пространстве, но и во времени, есть все основания предполагать, что аудиальная система каким-то образом «умеет» использовать временной код для их локализации. С этим явлением непосредственно связан эффект предшествования, к описанию которого мы переходим.

Эффект предшествования. В обычных условиях звук от стационарного источника достигает ушей разными путями (рис. 14.3). Некоторые звуковые волны воздействуют на слушателя непосредственно по выходе из источника звука, однако многие волны достигают ушей только после отражения от поверхностей и объектов, находящихся в непосредственной близости от звучащего объекта. Несмотря на многочисленные отражения (или эхо), создаваемые единичной волной, как правило, слышен только один звук, локализация которого основана преимущественно на *первом* воспринятом звуке. Если отражающие поверхности находятся не настолько далеко от нас, что требуется относительно продолжительное время (около 35 мс или более) для того, чтобы эхо достигло наших ушей, мы вообще не слышим его. Тенденция слышать только единичный звук, локализация которого определяется преимущественно временем прибытия первого звука, называется **эффектом предшествования**.

Эта демонстрация эффекта предшествования подчеркивает одно важное обстоятельство, а именно то, что аудиальная система придает большее значение первому звуку и проявляет тенденцию к подавлению звуков, прибывших позднее, в резуль-

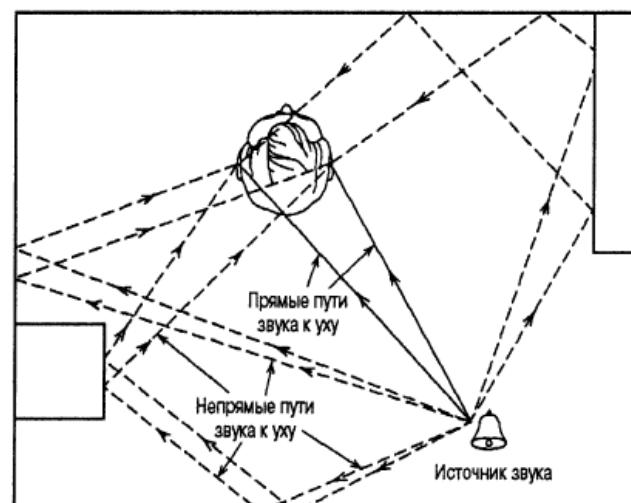


Рис. 14.3. Схематическое изображение путей звуков, создаваемых единственным источником звука

тате чего обычно воспринимается только один звук, пришедший из данной точки пространства (Pickles, 1988; Wallach et al., 1949). Нас окружает огромное количество отражающих поверхностей и отраженных звуков, поэтому первые звуки, услышанные наблюдателем, несут в себе наиболее точную информацию о локализации их источника. Звуковые волны последующих звуков, как правило, создают превратное представление о локализации, поскольку образовались в результате отражения первых волн от различных объектов. (Кстати, именно благодаря быстрым отражениям звука ваше собственное пение гораздо лучше звучит в ванной комнате или в душевой, чем в помещении большего размера, обладающем большим звукопоглощением. Кафель, которым выложены стены ванной комнаты, скорее отражает звуки, нежели поглощает их, благодаря чему создается иллюзия более богатого и насыщенного голоса.)

Экспериментальное подтверждение

Эффект предшествования

Эффект предшествования легко продемонстрировать с помощью двух громкоговорителей домашней стереосистемы, настроенной на монaurальное восприятие, т. е. таким образом, что оба громкоговорителя становятся источниками идентичной акустической стимуляции. (Восприятие стереофонического звука описано ниже.) Если оба громкоговорителя находятся на равном расстоянии от вас, то вы одновременно слышите звуки, исходящие от обоих. Но стоит вам сдвинуться вправо или влево, как вам покажется, что работает только один из них, т. е. что единственный источник звука — тот громкоговоритель, который ближе к вам. Возможно, звук, доходящий до вас из более удаленного громкоговорителя, запаздывает всего на несколько миллисекунд по сравнению со звуком, доходящим из того громкоговорителя, который находится ближе, однако этого незначительного различия достаточно для его подавления, по крайней мере в том, что касается его кажущейся локализации. Не исключено, что вы даже захотите проверить, работает более удаленный громкоговоритель или нет. Звук из более удаленного громкоговорителя, хотя он и кажется неслышным, на самом деле влияет на качество звука, исходящего из того громкоговорителя, который ближе к вам. В том, что это действительно так, вы убедитесь, если более удаленный громкоговоритель внезапно отключится: звук из громкоговорителя, расположенного ближе, покажется вам более тихим и менее «экспansивным».

Мы живем в обстановке, перенасыщенной всевозможными акустическими стимулами, и без эффекта предшествования восприятие даже самых обычных звуков было бы затруднительно, а правильная их локализация была бы невозможна (Degen, 1976). Именно поэтому нет ничего удивительного в том, что эффекту предшествования подвержены многие биологические виды, включая и насекомых (Wytenbach & Hoy, 1993).

Различие фаз. При определенных условиях, особенно когда речь идет о низкочастотных звуках, локализации источника звука может способствовать определение фазовой разности между звуками, достигающими правого и левого уха. Длина низкочастотных волн превышает диаметр головы. Огибая голову, такие волны могут разойтись по фазе (см. главу 12). А это значит, что звуковые волны, стимулирующие правое и левое ухо, могут находиться в разных стадиях цикла компрессия–разрежение; и в некоторых случаях это расхождение по фазе может сыграть роль

признака локализации звука. Но при локализации звуков, частота которых превышает 1000 Гц, расхождение по фазе значения не имеет (Oster, 1973).

Различие в интенсивности. Следующий бинауральный признак, называемый **интерауральным различием в интенсивности**, отражает различие в интенсивности стимуляции правого и левого уха. Преодолевая разные расстояния до левого и правого уха, звук не только первым стимулирует то ухо, которое находится ближе к его источнику, но и стимулирует его несколько более интенсивно. Причина этого явления преимущественно заключается в том, что голова играет роль некоего препятствия, мешающего продвижению звуковой волны к более удаленному уху. Как следует из рис. 14.2, голова «экранирует звук», и ухо, находящееся на противоположной источнику звука стороне, оказывается в ее «тени». Следовательно, звуковые волны, которым, чтобы достичь его, нужно обогнуть голову, теряют часть своей энергии и приходят к нему менее интенсивными, чем волны, стимулирующие ухо, находящееся на той же стороне, что и источник звука.

Чтобы объекты могли оказать экранирующее влияние на звуковую волну, они должны превосходить ее по своим пропорциям. А это значит, что длинные низкочастотные волны способны преодолеть экранирующее влияние головы. Поэтому влияние экранирующего эффекта головы на интерауральные различия интенсивности, возрастает по мере возрастания волновой частоты (т. е. по мере уменьшения длины волн). Известно, что различия в интенсивностях звуковых волн с частотой ниже 1000 Гц, исходящих от удаленных источников и стимулирующих правое и левое ухо, ничтожно малы (Kinsler & Frey, 1962). В подобных ситуациях локализация звуков базируется почти исключительно на интерауральном различии во времени.

Изложенное выше свидетельствует о том, что в основе локализации звуков, по крайней мере чистых тонов, лежат два различных механизма: локализация низкочастотных звуков базируется на интерауральном различии во времени, а локализация высокочастотных звуков — на интерауральном различии в интенсивности. Однако высокочастотные *сложные звуки*, содержащие различные гармоники, также могут быть локализованы на основании интераурального различия во времени.

В реальных условиях низкочастотные и высокочастотные сложные звуки, как правило, возникают одновременно, а это значит, что в большинстве житейских ситуаций успешная пространственная локализация звуков, скорее всего, зависит от обоих механизмов — и от интераурального различия во времени, и от интераурального различия в интенсивности (Haftet et al., 1990). Но хотя локализация звука действительно основана на восприятии интерауральных различий во времени и интенсивности, слушатель на практике не ощущает ни того, ни другого. Иными словами, он не осознает их существования, а слышит слитные звуки, возникающие в определенных точках пространства. Значит, в основе локализации звука лежит скорее последовательность нейронных процессов, чем сознательная оценка интенсивности акустических сигналов и времени их прибытия отдельно в правое и левое ухо.

Интерауральное различие в интенсивности и симуляция глухоты. Когда оба уха стимулируются одновременно одним тоном, но стимуляция одного уха более интенсивна, чем стимуляция другого, слушателю кажется, что звук приходит со

стороны того уха, которое стимулируется сильнее. Наблюдаемое явление аналогично эффекту предшествования: тон стимулирует только то ухо, которое получает более интенсивный сигнал. Однако более слабый сигнал, хотя он и не слышен, вносит свою лепту в громкость более интенсивного тона, и если его подачу внезапно прервать, громкость более интенсивного тона уменьшится.

Экспериментальное подтверждение

Интерауральное различие в интенсивности и локализация

Роль интераурального различия в интенсивности в локализации звука можно легко продемонстрировать с помощью домашней стереосистемы, настроенной на монауральное восприятие. Надев наушники, установите ручку «баланс» (она модулирует интенсивность звука индивидуально в правом и левом наушнике) так, чтобы вам казалось, что звук идет только из одного наушника. Прислушившись к звукам, исходящим из каждого наушника, вы убедитесь в том, что из настроенного на меньшую громкость наушника звук действительно идет. Вы просто не слышите его, потому что второе ухо стимулируется интенсивнее.

Теперь, познакомившись с этим экспериментом, вы лучше поймете исторический анекдот, связанный с локализацией звука. По данным Розенцвейга (Rosenzweig, 1961), в начале XX в. немецкий физик Стингер разработал клинический тест, позволяющий разоблачать тех, кто симулирует глухоту на одно ухо. Тест, который применяется и по сей день, основан на том, что изложено выше и описано в экспериментальном подтверждении. Например, человек, утверждающий, что он глух на левое ухо, подтверждает, что слышит звук, поданный через наушник на правое ухо. Что произойдет, если одновременно с этим звуком подать более интенсивный звук на левый наушник? В соответствии с тем, что изложено выше в тексте и в экспериментальном подтверждении, слушателю с нормальным слухом будет казаться, что работает только левый наушник, а человек, который действительно глух на левое ухо, будет слышать только менее интенсивный звук из правого наушника. В отличие от них симулянт (у которого совершенно нормальный слух, вследствие чего он слышит только звук, идущий из левого наушника), будет утверждать, что ничего не слышит, хотя на его правое ухо, на которое он вроде бы не жалуется, подается вполне слышимый звук, и таким образом разоблачит себя! Согласно Розенцвейгу, «эффективность этого теста делает совершенно очевидным, что слушатель [с нормальным слухом] слышит только один локализованный звук и не сравнивает отдельные ощущения, возникающие при стимуляции обоих ушей» (Rosenzweig, 1961, p. 132).

Стереофонический эффект. В типичной ситуации бинаурального звуковосприятия и левое, и правое ухо стимулируются сигналами, источники которых расположены на разном удалении от них, вследствие чего сами сигналы незначительно отличаются друг от друга по времени прибытия и интенсивности. Следовательно, чтобы записать акустическую картину, точно воспроизводящую активное бинауральное звуковосприятие, нужно иметь два разных микрофона и поместить их как можно ближе к слуховому каналу каждого уха. Записанные таким образом звуки сохраняют все обычно слышимые бинауральные различия (включая и те, что являются следствием влияния ушной раковины, о которой будет рассказано ниже).

Когда две не зависимые друг от друга записи воспроизводятся с помощью специальной аппаратуры через стереонаушники, они в точности воспроизводят исходную акустическую картину.

Стереофоническое звуковосприятие, представляющее собой уникальное аудиальное явление, возможно только в том случае, когда стереофонические записи воспроизводятся на специальной аппаратуре, имеющей два не зависимых друг от друга звуковоспроизводящих канала (наушника), с помощью которых уши стимулируются сигналами, несколько отличными друг от друга. Однако современная «коммерческая» стереофония базируется не столько на воспроизведении бинауральных различий, сколько на смешении разных звуковых сигналов в студии звукозаписи. Современная стереофония основана на записи звуков, улавливаемых несколькими микрофонами. Инженеры-акустики, специализирующиеся в области стереофонии, избирательно распределяют звуки, записанные с помощью нескольких микрофонов, на два канала, в результате чего при воспроизведении звукозаписи левое и правое ухо стимулируются по-разному и возникает стереоэффект. Более того, стереостимуляция создается почти исключительно за счет различия в интенсивности в двух каналах, различие во времени играет значительно меньшую роль (Moore, 1989).

Сейчас читателю уже понятно, что если звуки приходят только по одному каналу или если один канал настроен на большую интенсивность, чем второй, то для сл�ушателя источник звуков будет локализован в направлении этого канала. Само собой разумеется, что при равной интенсивности звуков они будут восприниматься так, словно их источник равнодален от обоих каналов.

Движения головы. Основываясь на интерауральных различиях во времени прибытия звуков и в их интенсивности, индивидуумы с бинауральным слухом способны локализовать источники звуков, расположенные горизонтально. Но вертикальная локализация звуков (т. е. локализация звучащих объектов, расположенных над наблюдателем или под ним) создает проблемы, поскольку стимуляция звуками, раздающимися сверху или снизу, может иметь одинаковые интерауральные различия во времени прибытия и интенсивности. Более того, если источник звука располагается на *срединной плоскости* (вокруг которой вертикальной плоскости, которая проходит через голову и делит туловище пополам), неподвижный слушатель вообще не может правильно локализовать его. Как следует из рис. 14.4, причина затруднений с локализацией звучащих объектов заключается в том, что в какой бы точке срединной плоскости они ни находились, они всегда равноудалены от обоих ушей, т. е. оба уха всегда стимулируются одновременно и интенсивность стиму-

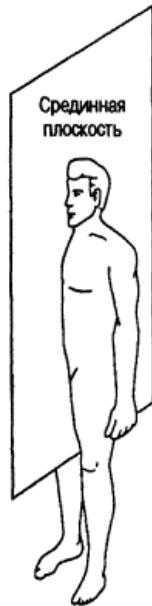


Рис. 14.4. Срединная плоскость неподвижного слушателя

Любой звук, возникающий на срединной плоскости находящегося в покое слушателя, всегда равноудален от обоих ушей. А это значит, что локализация звука невозможна, ибо нет ни интераурального различия, ни различия в интенсивности

ляции одинакова, что аналогично ситуации, представленной на рис. 14.2, В. Следовательно, звучащие объекты, попадающие на срединную плоскость слушателя, генерируют нулевые интерауральные различия во времени прибытия и интенсивности.

Эта проблема решается с помощью движений головы, которые создают интерауральные различия во времени прибытия и интенсивности. Так, если слушатель повернет голову налево, его левое ухо воспримет звук, источник которого расположен прямо за его спиной, быстрее и как более громкий, чем правое ухо. Аналогичным образом, поднимая или опуская голову, слушатель может локализовать вертикальные источники звуков. Вообще любое движение тела, создающее различие в стимуляции левого и правого уха, непосредственно отражающее положение источника звука, может помочь слушателю в локализации последнего.

Ушная раковина и локализация

Сложная поверхность, созданная складками и хрящевыми тканями **ушной раковины** (мясистого наружного выступа, располагающегося на голове сбоку, являющегося структурным элементом наружного уха большинства млекопитающих и описанного в главе 12), по-разному модифицирует и отражает звуки разных частот (и прежде всего — высокочастотные), направляющиеся в наружный слуховой проход. Наряду с движениями головы, влияние, оказываемое ушной раковиной на распределение звуковых волн, также может быть источником как монауральных признаков локализации звука (Batteau, 1967; Butler, 1987), так и бинауральных (Butler & Humanski, 1992; Oldfield & Parker, 1986). А это значит, что большие уши (и большие ушные раковины) не только повод для насмешек, но еще и более эффективное средство локализации звуков, нежели маленькие.

Экспериментальное подтверждение

Роль ушной раковины в звуковосприятии

Вы сами на собственном опыте легко можете убедиться в том, что благодаря ушной раковине возникают различные звуковые паттерны. Слушая собеседника, с помощью больших и указательных пальцев направьте свои ушные раковины в его сторону. В результате они начнут улавливать больше звуковых волн и возрастет количество звуков, отраженных от их поверхностей. Голос собеседника станет глубже, или более наполненным, и более громким. Теперь прижмите ушные раковины к голове — при этом вы «отодвигаете» их от собеседника, и количество улавливаемых ими звуковых волн, как и количество отраженных ими звуков, уменьшается. При этом голос собеседника начинает звучать слабее и кажется вам несколько более высоким.

В процессе звуковосприятия складки, углубления и изгибы ушной раковины играют роль небольших отражающих поверхностей, создающих для источников сложных звуков, которые находятся на разном направлении от слушателя, различные паттерны интерференции отраженных звуковых волн. В результате звуки, возникающие перед слушателем или над ним, могут восприниматься им иначе, чем звуки, источники которых находятся позади него или под ним. Авторы одного исследования лишили ушные раковины испытуемых способности отражать звуки,

заполнив их складки и углубления специальными пробками, изготовленными из формируемого полимерного материала, в результате чего точность локализации звуков испытуемыми значительно снизилась (Gardner & Gardner, 1973). Интересно отметить, однако, что с течением времени, благодаря приобретаемому опыту и надлежащей обратной связи, способность к локализации звуков, вначале существенно понизившаяся, восстанавливается, несмотря на неудаленные полимерные «пробки» (Hofman et al., 1998).

Локализация звука без ушной раковины. Все вышеизложенное преимущественно относится к биологическим видам, имеющим ушные раковины и симметрично расположенные уши. Однако амбарные совы, как и большинство птиц, не имеют ушных раковин. Вместо ушных раковин у них кожные складки, окаймленные перьями и называемые «гребнями», которые прикрывают вход в наружный слуховой проход. Кроме того, уши амбарной совы расположены несимметрично: правое ухо и вход в правый наружный слуховой проход немножко приподняты вверх, а левое ухо и вход в левый наружный слуховой проход слегка опущены вниз, что помогает птицам при локализации вертикальных и горизонтальных звучащих объектов, особенно источников высокочастотных звуков (Knudsen, 1981; Cohen & Knudsen, 1999). Следовательно, звук, источник которого расположен на срединной плоскости амбарной совы — ночной птицы, обладающей исключительными охотниччьими навыками, — вначале достигает одного ее уха, в то время как у большинства позвоночных звуки от подобных источников достигают обоих ушей одновременно. У нас есть все основания для того, чтобы утверждать: структурная асимметрия ушей амбарной совы является адаптивной особенностью ночного охотника. Как правило, амбарная сова охотится ночью и слету (обычно на мелких грызунов и насекомых) и должна определять местоположение своей жертвы, ориентируясь главным образом на слабые, едва различимые звуки.

Эхолокация

Природная среда обитания многих позвоночных, включая летучих мышей, дельфинов, китов и, возможно, некоторых мелких грызунов, требует от них активности в таких ситуациях, при которых зрение мало чем может помочь им либо вовсе бесполезно. Например, летучие мыши — единственные летающие млекопитающие — активны по ночам и в темноте. Точно так же и морские млекопитающие: дельфины и киты способны перемещаться на такой глубине, куда свет практически не доходит. Благодаря необходимости эффективно прокладывать себе путь в подобных условиях у этих животных развилась способность к восприятию эха их собственных звуков, возникающего при отражении последних от окружающих объектов. Улавливая эти отраженные звуки, животные без помощи зрения на расстоянии получают точную и почти мгновенную информацию об удаленности и направлении движения различных объектов, а возможно, и о скорости их перемещения, траектории, размере, форме, текстуре и принадлежности к определенному виду (Norris, 1991). Использование организмом акустического сигнала, возникшего в результате отражения генерированного им звука, для получения подобной биологически релевантной информации называется **эхолокацией**.

Объектом изучения большинства исследователей эхолокации стали летучие мыши, основной сенсорной модальностью которых является слух. В настоящее время на Земле живет около 600 видов этих млекопитающих, и преследование всеми этими видами своей добычи основано на эхолокации (Simmons, Fenton & O'Fannell, 1979). Совершая ночные полеты, летучие мыши избегают столкновений с препятствиями, которые не толще человеческого волоса и не длиннее 0,1 дюйма (около 25 мм), а также локализуют свою добычу и нападают на нее с почти безупречной точностью даже тогда, когда и они сами, и их жертвы летят сравнительно быстро. Летучие мыши совершают все эти «подвиги» благодаря тому, что генерируют упругие **ультразвуковые импульсы** — звуковые волны, крики и чириканье, частоты которых лежат за пределами человеческого слуха и нередко превышают 100 кГц, а также воспринимают звуки, возникающие в результате отражения этих импульсов от окружающих объектов (рис. 14.5).

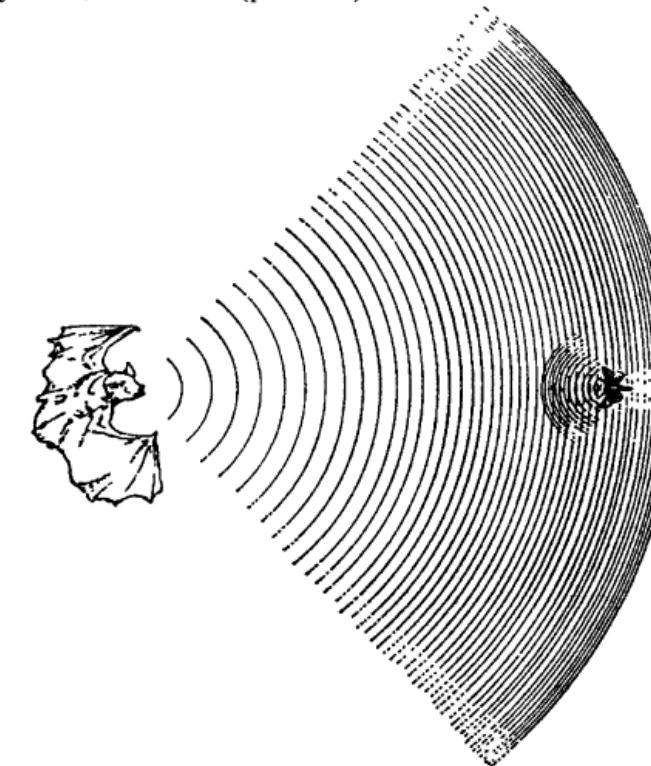


Рис. 14.5. Летучая мышь и схематическое изображение генерируемого ею ультразвукового импульса. Концентрически расположенные дуги — индивидуальные звуковые волны, входящие в состав единичного импульса. Частота и длина звуковых волн, образующих один импульс, могут быть разными. Рисунок, который по свидетельству его автора выполнен с сохранением масштаба, дает представление о том, сколь незначительно количество звуковой энергии, отражаемой одним насекомым. Для некоторых видов летучих мышей, например для коричневой летучей мыши, распространенной на северо-востоке, эффективное эхолокационное расстояние может достигать 20 футов (около 7 м). (Источник: D. R. Griffin. *Echoes of bats and man*. Garden City, N. Y.: Anchor Books/Double-day:1959, p. 86)

Генерирование и восприятие ультразвука летучими мышами объясняют их способность избегать столкновений с препятствиями, а также идентифицировать и преследовать свои жертвы. Эта особенность — следствие некоторых факторов, определяющих распространение звуковых волн, в частности того, что высокочастотные звуки при отражении рассеиваются в меньшей степени, чем низкочастотные. Более важно, однако, то, что отражение звука зависит от соотношения между длиной отражающейся звуковой волны и величиной того объекта, от которого она отражается. Чтобы, отразившись от объекта, вернуться к своему «источнику» с полезной для него информацией, звуковая волна должна иметь длину, меньшую, чем объект, в противном случае она обогнет его. Что касается летучих мышей, то их любимое лакомство — моль, всевозможные жуки и комары, так что использование высокочастотных (т. е. коротковолновых) звуков для них жизненно важно. Это же обстоятельство подчеркивает и значимость для летучих мышей чрезвычайно высокого верхнего предела их слуха.

Эхолокация предполагает оценку вернувшегося отраженного звука (эха). Некоторые летучие мыши вылавливают свои жертвы, издавая очень короткие чириканья, или импульсы, частота которых быстро изменяется. Этот тип звуковой эмиссии, называемой *частотно модулированной* (ЧМ), представляет собой очень сложное явление (с точки зрения определения величин входящих в ее состав частот). Когда возникает импульс, частота которого изменяется во времени, звуки, отраженные от объектов, находящихся на разных расстояниях от источника импульса, возвращаются в разное время, вследствие чего воспринимаются как звуки разной частоты. (Генерируемые частоты, как и временные паттерны эмиссий, у летучих мышей различных видов различны.) Если же частотно модулированное возвращающееся эхо сначала достигает одного уха, а затем другого, оно каждым ухом воспринимается с разной частотой.

Анатомия летучей мыши, как и ее аудиальная система, в высшей степени адаптированы к аудиальной локализации. Органы, благодаря которым летучая мышь оказывается способной к эхолокации и которые нередко воспринимаются людьми как пугающие аномалии (речь идет об ушах и особенно о морде летучей мыши), занимают большую часть туловища этого небольшого млекопитающего. Восприятию летучей мышью высокочастотных звуков способствуют структурные анатомические особенности ее аудиальной и вокальной систем. Например, область улитки, примыкающая к среднему уху и участвующая в восприятии высоких частот, у летучих мышей необычно большая по размеру. Более того, голосовые структуры летучей мыши исключительно хорошо приспособлены для генерирования ультразвуковых импульсов (Griffin, 1958, 1959), а экстраординарный слух — к восприятию чрезвычайно слабых отраженных звуков.

Хотя в ходе эволюции у разных видов летучих мышей сформировались разные эхолокационные механизмы, общий принцип их действия таков: генерирование коротких ультразвуковых чирикань, или импульсов, и их сравнение уникальной аудиальной системой летучей мыши с возвращающимися отраженными звуками. Это сравнение предполагает оценку временных и частотных различий между генерированным импульсом и вернувшимся эхом, а также оценку различий их интенсивности. Во многих отношениях общий принцип подобного механизма эхолока-

ции идентичен принципу действия сонара — прибора, используемого для звуковой навигации в воде (название образовано из первых слогов английских слов «звук», «навигация» и «ранжирование»).

Нейроны, настроенные на восприятие временного интервала между импульсом и отраженным звуком. Предположение о том, что способность летучих мышей к эхолокации имеет нейронную основу (Dear, Simmons & Fritz, 1993), находит подтверждение. Суть этого предположения заключается в следующем: та часть мозга летучей мыши, которая обрабатывает аудиальную информацию, образована особыми нейронами, избирательно настроенными на обработку *временного интервала* (или времени задержки) между генерированием летучей мышью импульса и приема ею его эха — звука, отраженного от какого-либо объекта. Авторы назвали эти нейроны *нейронами, настроенными на восприятие временного интервала между импульсом и отраженным звуком*. Это означает, что разные типы этих нейронов, содержащихся в мозге летучей мыши и чувствительных к фактору времени, настроены на восприятие отраженных звуков, прибывающих через определенные промежутки времени после эмиссии импульса. Иными словами, разные нейроны реагируют на разные временные интервалы. Так, отраженные звуки с непродолжительным временным интервалом (т. е. звуки, отраженные от объектов, находящихся поблизости) активируют нейроны, отличные от тех, которые активируются отраженными звуками, имеющими длительный временной интервал (т. е. отраженными от более удаленных объектов). Группы таких нейронов, настроенных на восприятие разных временных интервалов, в любой момент времени активируются одновременно, в результате чего у летучей мыши создается «акустический образ» того, что находится в пространстве в непосредственной близости от нее.

Восприятие препятствий слепыми людьми

Способностью обнаруживать близлежащие препятствия и избегать столкновений с ними обладают многие незрячие люди. Как правило, они не могут объяснить эту необычную и нередко ставящую в тупик способность, которая отличается от описанного в главе 4 «слепозрения». В результате возникло несколько теорий невизуальной локализации объектов людьми. Одна из ранних и некогда плодотворных теорий исходила из того, что у некоторых незрячих людей настолько хорошо развиты тактильные ощущения и восприятие температуры, что они способны чувствовать воздушные потоки, обтекающие объекты, которые находятся поблизости. Поскольку считалось, что тактильные и температурные ощущения воспринимаются преимущественно лицом, эта теория получила название теории «лицевого зрения» (Worshel & Dallenbach, 1947). Вторая теория, объясняющая восприятие объектов незрячими людьми, основана на аудиальных признаках в форме эха и отражений от объектов. Ниже будут описаны некоторые эксперименты, проведенные в 1940-х гг. для проверки обеих теорий.

Эхолокация у человека. В одной из работ, посвященных изучению этого феномена (Supra, Cotzin & Dallenbach, 1944), представлены результаты изучения эффективности аудиальных признаков в восприятии препятствий, полученные в ходе тестирования слепых и зрячих людей, которым завязывали глаза. Испытуемый должен был пройти по коридору, сообщить, когда ему казалось, что он приближал-

ся к стене, и подойти к ней как можно ближе, но не столкнуться с ней. Если роль аудиальных признаков была существенно снижена, т. е. если испытуемые шли в носках по толстому ковру, если они надевали наушники, усилившие маскирующий внешний шум, или затыкали уши, способность избегать столкновений с объектами значительно снижалась или вовсе пропадала. Плохая ориентировка в пространстве и тогда, когда потенциальная информация о воздушных потоках, омывающих голову, руки и ладони, была абсолютно доступна, свидетельствует о том, что одного лишь «лицевого зрения» недостаточно для дистанционного восприятия препятствий. Следовательно, в том, что незрячие люди способны избегать столкновений с препятствиями, решающую роль играет такой источник информации, как звук.

Дальнейшее подтверждение этого вывода получил в результате проведения необычного эксперимента, в ходе которого были исключены все сенсорные модальности, кроме одной — слуха. Испытуемых, находившихся в звуконепроницаемом помещении, просили оценить приближение экспериментатора к препятствию по звуку его шагов. Этот звук улавливался микрофоном, помещенным на уровне уха экспериментатора, и передавался с помощью усилителя в наушники испытуемых. Оказалось, что приближение экспериментатора к препятствию смогли зафиксировать все испытуемые. Менее эффективными испытуемые оказались при выполнении задания, когда сами приближались к препятствию. Результаты этих экспериментов свидетельствуют не только о способности незрячих людей воспринимать препятствия на основании отраженной аудиальной информации (т. е. на основании самогенерируемого эха), но также и о том, что при обнаружении препятствий аудиальная информация и необходима, и достаточна.

Использование незрячими людьми самогенерируемых отраженных звуков для получения пространственной информации не ограничивается лабораторными условиями. Когда трость слепого человека касается различных поверхностей, она извлекает из них необходимую ему пространственную информацию. Однако и сами по себе звуки, возникающие при постукивании трости и отражающиеся от расположенных поблизости поверхностей, могут сообщить незрячему человеку полезную информацию о других поверхностях и препятствиях (Farmer & Smith, 1977).

Поразительный пример использования отраженного звука в качестве источника информации о местоположении в реальных, а не в лабораторных условиях — является слепая от рождения наездница, победительница соревнований студентов колледжей. Ее способность огибать углы и вписываться в крутые повороты трассы во время соревнования основана на восприятии отраженных звуков, источниками которых являются звуки, производимые ее лошадью. Она сама написала об этом так: «Когда подковы моей лошади касаются земли, я слышу звуки, отражающиеся при этом от заграждения» (Knouse, 1988, p. 8).

Способность человека к эхолокации ставит перед нами несколько вопросов. На сколько адекватно восприятие пространства, основанное на звуковых признаках? Возможно ли восприятие различий между объектами на основании отраженных звуков? Какие аспекты отраженных звуков наиболее эффективны в локализации? В работе (Kellogg, 1962) представлены результаты исследований, в которых сравнивалось выполнение определенных заданий по пространственной локализации

слепыми и зрячими людьми с завязанными глазами. Особо следует отметить то, что испытуемым разрешалось издавать любые звуки, эхо которых помогало им в локализации. Хотя некоторые испытуемые прищелкивали языком, щелкали пальцами, издавали звуки, похожие на шипение, или свистели, качая головой, чаще всего они предпочитали собственный нормальный голос и постоянное многократное повторение одного и того же слова.

Келлогг установил, что незрячие испытуемые способны эффективно извлекать информацию об удаленности и размере с помощью самогенерируемых звуков, а результаты, достигнутые зрячими индивидуумами с завязанными глазами, скорее носят случайный характер. В отличие от зрячих индивидуумов с завязанными глазами незрячие испытуемые могли также различить акустические поверхности с разными текстурами, как металл, стекло, дерево, грубая хлопчатобумажная ткань и бархат. Вывод, который может быть сделан на основании исследований Келлогга, заключается в следующем: опыт, приобретаемый незрячими людьми в использовании эха самогенерируемых звуков, не только позволяет им избегать столкновений с препятствиями, но и дает достаточно информации для того, чтобы надежно отличать одни объекты от других.

Не следует, однако, думать, что зрячие люди неспособны использовать отраженные звуки в качестве источников пространственной информации. Известно, например, что только по звуку, которым сопровождается падение на твердую поверхность узких деревянных досок длиной от 30 до 120 см, они достаточно точно определяют длину последних (Carello et al., 1998). По данным, опубликованным в работе (Kunkler-Peck & Turvey, 2000), зрячие индивидуумы, ориентируясь исключительно по звуку, возникшему при ударе молотком, достаточно точно определяли, какую форму — круглую, треугольную или квадратную — имеют объекты из стали, стекла или плексигласа. И последнее. Эффективным источником пространственной информации может быть не только эхо звуков, генерируемых самим индивидуумом, но и эхо тех звуков, которые непосредственно связаны с окружающей его обстановкой. Так, изменение (увеличение) частоты звука, отраженного от емкости с водой, представляет собой информативный акустический стимул, с помощью которого как незрячие люди, так и зрячие индивидуумы с завязанными глазами могут судить о степени заполнения последней (Cabe & Pittenger, 2000).

Решающее значение в использовании отраженных звуков для локализации препятствий имеет изменение высоты эха самогенерируемых звуков со средней частотой (Cotzin & Dallenbach, 1950; Rice, 1967). В этом нет ничего удивительного, ибо чем выше частота звука, тем короче звуковая волна (см. главу 12, рис. 12.4), а коротковолновые звуки, отражаясь от различных объектов, образуют более эффективное эхо. Как уже отмечалось выше в связи с тем, что летучие мыши генерируют высокочастотные импульсы и эхо, локализация объекта лимитируется длиной волны: чтобы отраженный звук был достаточно эффективным, отражающий объект должен быть как минимум сопоставим по размеру с длиной отражающейся от него звуковой волны. Следовательно, чтобы с помощью отраженного звука можно было локализовать объект, длина отражающейся от него звуковой волны должна быть меньше, чем он сам. Однако низкочастотные обтекающие звуки, как те, что воспринимаются индивидуумом при ходьбе в замкнутом пространстве (например, при движении по коридору вдоль стены), тоже могут быть полезны для его простран-

ственной ориентации и передвижения (локомоции). Известно, что слабовидящие дети незаметно, но эффективно используют низкочастотные звуки как для пространственной навигации, так и для локализации звучащих объектов (Ashmead et al., 1998; Carlson-Smith & Wiener, 1996).

Визуальный опыт и невизуальная пространственная навигация. В пространственной локализации объектов слепыми людьми и в их ориентации в пространстве определенную роль может играть и возраст, в котором они лишились зрения. Индивидуумы, успевшие приобрести некоторый визуальный опыт, могут более успешно справляться с некоторыми задачами, требующими пространственной локализации объектов и ориентации в пространстве, чем люди, слепые от рождения или ослепшие в очень раннем детстве (Hollins & Kelley, 1988; Veraart & Wanet-Defalque, 1987). Одно из объяснений этого явления заключается в том, что благодаря раннему визуальному опыту слепой человек приобретает способность лучше понимать пространственные связи и мысленно создавать картины окружающей обстановки. В соответствии с подобной трактовкой предшествовавший слепоте визуальный опыт облегчает использование невизуальных признаков для адекватного восприятия пространства (Veraart & Wanet-Defalque, 1987).

Однако вопрос о роли предшествующего визуального опыта в умении слепых людей ориентироваться в пространстве пока что остается открытым. Из данных, представленных в работах (Loomis et al., 1993; Ashmead et al., 1998; Passini et al., 1990), следует, что некоторые слепые от рождения индивидуумы лучше, чем зрющие люди с завязанными глазами, справляются с такими задачами, требующими ориентации в пространстве, как проход туда и обратно по сложной трассе. Хотя предположение о том, что предшествующий визуальный опыт дает слепым людям некоторые преимущества в навигации, локализации и ориентации, и представляется вполне обоснованным, идентификация конкретной причины этого явления остается проблематичной (Klatsky et al., 1995).

Прежде чем перейти к рассмотрению других вопросов, мы кратко расскажем об *индивидуальной системе ориентации*, представляющей собой невизуальное навигационное вспомогательное средство.

Индивидуальная система ориентации. Многокомпонентная навигационная система, назначение которой — помочь передвигаться слепому человеку, ведущему активный образ жизни, называется *индивидуальной системой ориентации* (Golledge et al., 1991; Golledge, Loomis & Klatsky, 1994; Loomis et al., 1994). Эта система основана на использовании звука для информирования индивидуумов о том, где они находятся в данный момент, и для их ориентации относительно объектов, находящихся в непосредственной близости от них. Управляемое компьютером устройство воспринимает визуальные сигналы о расположении объектов вблизи индивидуума, преобразовывает их в направленные звуковые сигналы и направляет последние индивидууму через бинауральные наушники. Более того, эти бинауральные звуковые сигналы, поступающие от объекта, характеризуются теми же различиями во времени прибытия и интенсивности, которые были бы свойственны источнику звука, находящемуся в той же точке пространства, что и данный объект. Иными словами, звуковые сигналы, поступающие от данного объекта в левое и правое ухо индивидуума, имеют те же различия во времени прибытия и в интен-

сивности, что имели бы звуковые сигналы, которые издавал бы этот объект, если бы он действительно был звучащим объектом. В результате объекты «превращаются» в звуки, лежащие в определенной точке аудиального пространства слепого человека, что позволяет ему на основе «звуковой карты» создать «пространственную карту». В одном из вариантов этого приспособления, основанном на компьютеризированной карте местности, на которой должен перемещаться слепой человек, он действительно слышит, как объекты «идентифицируют себя» узнаваемыми звуками или даже словами («стена», «стул», «стол» и т. д.).

Станет ли какой-либо определенный вариант индивидуальной системы ориентации надежным стандартным средством увеличения подвижности незрячих людей, зависит от технологии его изготовления и результатов его испытаний. Однако сам факт создания подобной системы в любом случае является впечатляющей демонстрацией того, как базовые принципы слуха могут быть использованы для решения важной практической проблемы.

Восприятие музыки

Мы рассмотрели целый ряд психоакустических принципов, процессов и фактов, преимущественно имеющих отношение к восприятию относительно простых звуков, генерируемых в лабораторных условиях. Однако человек способен и к уникальному восприятию последовательности звуков разной частоты, интенсивности, сложности и продолжительности. Речь идет о восприятии *музыки*.

Музыка — и это необходимо подчеркнуть в самом начале — совершенно особая и сложная форма аудиальной информации. Охарактеризовать последовательность музыкальных тонов исключительно с точки зрения их физических свойств и параметров и создать представление об их сочетании как о музыке — отнюдь не одно и то же. Во-первых, мы воспринимаем музыку как нечто гораздо большее, чем ряд отдельных звуков; эти звуки психологически интегрированы и воспринимаются нами как хорошо оформленные, организованные и когерентные паттерны, в которых мы узнаем музыкальные фразы, или мелодии. Мелодический паттерн может произвести столь сильное впечатление и вызывать такое восхищение, что нередко после однократного прослушивания мы не только узнаём его, но даже можем воспроизвести его по памяти. Более того, в отличие от восприятия традиционно окружающих нас звуков восприятие музыки превращает нас в активных слушателей, оно вызывает к жизни разнообразные сложные процессы, связанные отчасти с предшествующим музыкальным опытом, личными эстетическими вкусами и ожиданиями, а также с когнитивными и эмоциональными ассоциациями (Boltz, 1993; Schmuckler, 1997).

Чем музыка отличается от набора звуков с разными физическими характеристиками? Ответ на этот вопрос лежит в организованном характере стимуляции — в связи между отдельными тонами, или в их *контексте*. Нашим целям соответствует определение музыки как последовательности *взаимосвязанных* тонов, образующих когерентный, ритмичный паттерн — *мелодию*. Иными словами, музыка — это организованное особым образом воздействие на психику человека, являющееся результатом контекста, в котором возникают отдельные звуки.

Параметры музыки

Исчерпывающее понимание восприятия музыки требует обсуждения многих технических деталей, доступных только специалистам. Однако мы можем, воспользовавшись уже имеющимися знаниями по психоакустике, охарактеризовать связь между некоторыми основополагающими психологическими явлениями музыки и физическими свойствами музыкальных тонов, или нот, способствующих восприятию этих явлений как музыки. Начнем же мы с описания некоторых базовых взаимосвязей между музыкальными звуками, которые благоприятствуют их уникальному восприятию в качестве музыки.

Октыавы. Простая числовая связь между музыкальными звуками, на которой базируется западноевропейская звуковая система (пифагоров строй. — *Примеч. пер.*), была открыта древнегреческим математиком и философом Пифагором (472–497 гг. до н. э.). Он обратил внимание на то, что высота звука, извлекаемого из струнного музыкального инструмента, зависит от длины струны, являющейся его источником. Он также заметил, что если одна струна в два раза длиннее другой, равной ей по толщине, то частота производимого ею звука в два раза меньше частоты звука, производимого более короткой струной. В акустике единица частотного интервала, равная интервалу между двумя частотами с соотношением 2 : 1, называется **октавой**; о двух частотах, из которых одна в два раза более другой, также говорят, что они разделены **октавой**. Итак, интервал между любыми двумя тонами, частота одного из которых ровно в два раза больше частоты другого, называется **октавой**. Следовательно, чтобы тон стал на октаву выше, достаточно удвоить его частоту. Например, тон, частота которого равна 880 Гц (т. е. A₅ в соответствии с современным нотным письмом, описанным ниже), на одну октаву выше, чем тон с частотой, равной 440 Гц (A₄).

Нотное письмо (нотация). В западноевропейской нотации тон обозначается буквой, определяющей его положение в данной октаве, и цифрой, указывающей, какой именно октаве он принадлежит. Так, для обозначения положения тона *внутри* октавы используются буквы C, D, E, F, G, A, D и в обратном порядке вплоть до C. Номер октавы, которой принадлежит данный тон, обозначается арабской цифрой, например C₃, D₄, E₅.

Такие тоны, как C₃ и C₄, а также C₄ и C₅, отделены друг от друга одной октавой и оказывают на слушателя весьма сходное психологическое воздействие. Так, в выше приведенном примере, хотя тон с частотой 880 Гц (A₅) воспринимается как более высокий, он все же по своему звучанию очень похож на тон с частотой 440 Гц (A₄). Звуки, отстоящие друг от друга на расстоянии одной октавы, кажутся более похожими друг на друга, чем звуки, расстояние между которыми менее одной октавы. В качестве примера можно привести звуки с частотой 261,63 и 523,25 Гц (т. е. звуки C₄ и C₅), отделенные друг от друга одной октавой, которые значительно больше похожи по звучанию, чем звуки с частотой 261,63 и 392 Гц (т. е. звуки C₄ и G₄), расстояние между которыми значительно меньше октавы.

Эквивалентность октав, высота тона и тональный хроматизм. Отношение каждого тона данной октавы к любому другому тону данной октавы для всех октав одинаково. Это значит, что в то время, как E₄ звучит примерно так же, но несколько ниже, чем E₅, соотношение между E₄, D₄ и F₄ такое же, как между E₅, D₅ и F₅.

Перцептивное сходство тонов, отстоящих друг от друга на расстоянии октавы, например сходство E₄ с E₅, D₄ с D₅, называется **эквивалентностью октав** и подчеркивает то обстоятельство, что в музыкальном контексте тон должен оцениваться не только с точки зрения его высоты. Это можно проиллюстрировать с помощью необычной фигуры, аналогичной старомодной традиционной вывеске цирюльника — шесту, окрашенному по спирали в красный и белый цвета, превращенной в винтовую (геликоидальную) спираль (рис. 14.6). (Эта конфигурация основана на схеме, предложенной в 1846 г. М. У. Дробишием и описанной в работе Ruckmick, 1929.)

Вертикальный параметр, называемый **высотой тона**, характеризует результирующую высоту звука (т. е. ощущение высоты звука) и зависит от частоты стимула. На горизонтальных плоскостях, являющихся виткам спирали, представлен параметр, называемый **тональным хроматизмом** и отражающий относительное положение данного тона внутри данной октавы. Один полный виток спирали соответствует одной октаве. Звуки, принадлежащие разным октавам и отстоящие друг от друга на расстоянии одной октавы (например, G₂, G₃ и G₄), лежат на одной оси и близко примыкают друг к другу.

С точки зрения восприятия важна не только эквивалентность октав, но и другие соотношения между музыкальными тонами. Например, если частота одного тона в полтора раза больше частоты другого (соотношение между частотами, равное 3 : 2, называется *идеальной квинтой*) или если частоты двух тонов относятся, как 4 : 3, то при совместном звучании эти тоны консонируют в отличие от тонов, частоты которых связаны другими соотношениями (исключение составляют тоны, отношение частот которых равно 2 и которые отстоят друг от друга на расстоянии одной октавы. См. Krumhansl & Kessler, 1982).

Абсолютный, или идеальный, слух и неспособность различать звуковые тоны

Некоторые люди способны различать, идентифицировать и даже воспроизводить отдельные музыкальные тоны в отсутствие музыкального первоисточника или стандарта. Эта способность называется **абсолютным, или идеальным, слухом**. (Обзор литературы на эту тему см. в работе: Gregersen, 1998.) Абсолютный слух — редкость даже среди профессиональных музыкантов, и им обладает менее 1 % всего

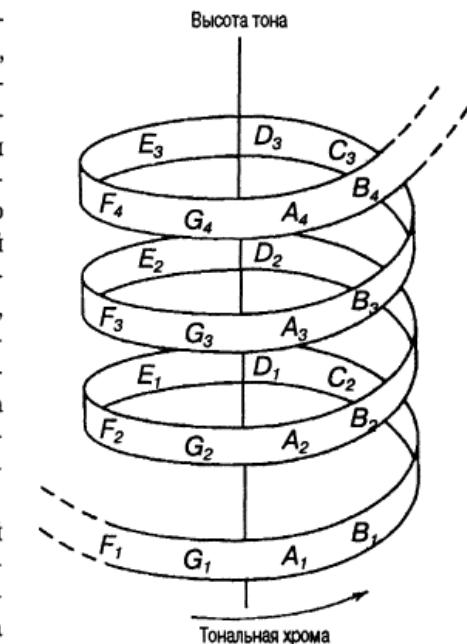


Рис. 14.6. Двухмерное представление высоты звука

Высота тона отражает результирующую высоту, которая зависит от частоты стимула, а тональная хрома — положение тона внутри данной октавы

населения (Moore, 1989), хотя среди музыкантов, начавших обучение в очень раннем детстве, люди с абсолютным слухом встречаются несколько чаще (Baharloo et al., 1998; Rauschecker, 1999; Deutsch et al., 1999). Хотя продолжительное обучение и способствует развитию абсолютного слуха, он во многом определяется генетическими факторами (Baharloo et al., 1998). Более того, с помощью ПЭТ в слуховой коре левого полушария были идентифицированы «ответственные» за него нейроны (Schlaug et al., 1995; Zatorre et al., 1994).

Поскольку едва ли все обладатели абсолютного слуха начали свое музыкальное образование очень рано (когда им не было еще и шести лет), весьма вероятно, что систематическое общение с музыкой в раннем детстве условие необходимое, но не достаточное для его развития (Baharloo et al., 1998; Miyazaki, 1988; Deutsch et al., 1999). (Кстати, хотя сам по себе ранний музыкальный опыт и не является гарантией развития абсолютного музыкального слуха, исходя из данных, представленных в работе Chan et al., 1998, можно предположить, что он улучшает вербальную память.) В этом смысле абсолютный слух — хороший пример того, как сочетание генетических и средовых факторов способствует развитию сложной перцептивной способности.

О том, что такое абсолютный слух, можно судить по историческому анекдоту, приведенному в работе Stevens & Warshofsky, 1965: гениальный композитор Вольфганг Амадей Моцарт, обладавший абсолютным слухом, в семилетнем возрасте как-то сказал, что его скрипка настроена на четверть тона выше, чем скрипка его друга, на которой он играл накануне!

В известном смысле противоположностью абсолютному слуху является *неспособность различать звуковые тоны* (*tone deafness*). Понятно, что сам по себе этот термин некорректен (в дословном переводе с английского *tone deafness* — «тональная глухота». — Примеч. пер.), ибо большинство из «тонально глухих» ничуть не хуже различают два разных по высоте тона, чем «нормальные» индивидуумы. Не исключено, что те, кого признают неспособными различать звуковые тоны, всего лишь испытывают большие, чем другие люди, затруднения, когда им нужно воспроизвести или пропеть какой-то музыкальный пассаж, образованный звуками, которыми они обычно не пользуются в нормальной речи (Moore, 1989). Более того, в результате занятий музыкой и практики эти люди заметно прогрессируют, а это значит, что основной причиной неспособности различать звуковые тоны является ограниченный опыт общения с музыкальным материалом.

Музыкальная агнозия: амузия. Несмотря на то что такой диагноз, как «тональная глухота» и может быть подвергнут сомнению, известна определенная форма аудиальной *агнозии* — недуга, причина которого заключается в нарушении функции определенных участков височных долей, избирательно влияющим на восприятие музыки (Peretz et al., 1994; Peretz, 1993, 1996). Этот недуг, называемый *музыкальной агнозией*, или *амузией*, проявляется в неспособности распознавать мелодии и тональности. Однако он не влияет на восприятие иной акустической информации, такой, например, как речь и те звуки, которые постоянно сопровождают нас в повседневной жизни (Patel et al., 1998). То, что это неврологическое заболевание касается только восприятия музыки, позволяет предположить наличие в аудиальной системе определенных нейронных контуров (*neural circuits*) и кортикальных

подсистем, избирательно настроенных на обработку музыкальной информации (Peretz & Morais, 1989, 1993; Tramo et al., 1990). В пользу этого предположения свидетельствуют и результаты наблюдений над пациентами, перенесшими операции, в результате которых правое и левое полушария их мозга были отделены друг от друга и начали функционировать самостоятельно. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что обработка информации о некоторых отличительных признаках музыки, и в первую очередь тех, которые связаны с гармонией, происходит в правом полушарии (Tramo, 1993; Tramo & Bharucha, 1991).

Трудно удержаться от соблазна высказать предположение, что амузия является поведенческим последствием неспособности извлечь из такого аудиального стимула, как музыка, целостную — в гештальтистском смысле этого слова — информацию. И мы переходим к рассмотрению роли гештальтистских факторов группирования в восприятии музыки.

Восприятие последовательности тонов разной высоты: мелодии

Гештальтистские факторы группирования. Несмотря на то что музыка — это упорядоченная согласованность тонов, следующих друг за другом во времени, как правило, мы не слышим отдельных звуков. Вместо них мы слышим образованные именем отдельные, отличные от других сочетания звуков, обладающие мелодической структурой. Складывается такое впечатление, что в основе восприятия мелодий лежат как некоторые глобальные свойства сочетания тонов, так и организационные тенденции слушателя, структурно аналогичные *гештальтистским факторам группирования*, которые характерны для визуального восприятия формы и паттерна и описаны в главе 7 (Deliege, 1987; Deutsch, 1982; Sloboda, 1985). Мы расскажем лишь о некоторых из этих базовых факторов, определяющих восприятие музыки, но и они наглядно иллюстрируют то, что слушатель находится во власти гештальтистского подхода к восприятию музыки.

Фактор близости. В соответствии с гештальтистским фактором *близости* для элементов, расположенныхных близко друг к другу во времени или в пространстве, характерна тенденция быть объединенными, или сгруппированными. Применительно к музыке это означает, что для звуков, быстро следующих один за другим и потому производящих впечатление близко расположенных друг к другу во времени (термин «близко» в данном случае означает, что звуки следует непосредственно один за другим), характерна тенденция быть воспринятыми как часть одной и той же музыкальной фразы (Monahan et al., 1987).

Фактор сходства. Гештальтистский фактор *сходства* тоже применим к восприятию музыки, которая по своей природе организована. Идентичные по высоте звуки воспринимаются как связанные воедино, т. е. как образующие единую перцептивную группу в определенном музыкальном контексте. Так, когда одновременно звучат несколько различных нот какого-либо короткого музыкального пассажа, слушатель склонен воспринимать звуки одинаковой высоты как единый элемент мелодии.

Фактор «общей судьбы». Когда соседствующие друг с другом звуки какой-либо музыкальной фразы объединяются таким образом, что паттерн высоты изменяется,

например, когда они вместе становятся выше или ниже или когда они вызывают изменение паттерна интенсивности (одновременно смолкают или начинают звучать), они воспринимаются как группа или как часть единой музыкальной фразы. Иными словами, если два или более компонентов сложного музыкального пассажа претерпевают одни и те же изменения в одно и то же время, они группируются и воспринимаются как единый элемент. Описанная ситуация является примером проявления гештальтистского фактора «общей судьбы», который применительно к визуальному восприятию означает, что идентичные элементы, которые движутся вместе в одном направлении, воспринимаются как часть одной и той же перцептивной единицы.

Фактор замкнутости. Такие психологически связанные между собой звуки, как музыка или разговор, генерируемые постоянным источником, часто прерываются и на короткое время заглушаются, или маскируются, другими звуками. Однако даже при возникновении интенсивной помехи слушатель, как правило, продолжает слышать музыку. Например, когда мы слушаем музыку в едущем автомобиле, в нее постоянно вторгаются шум мотора и уличный шум, но мы практически не осознаем никаких «провалов» в ее звучании. Вспомните, что в главе 7 мы уже говорили о тенденции перцептивно «заполнять пробелы» и воспринимать физически неполные последовательности как продолжающиеся и что эта тенденция называется *фактором замкнутости*.

Сочетание «фигура—фон». В восприятии музыки проявляются и закономерности, свойственные восприятию сочетания «фигура—фон». Мы склонны воспринимать доминирующую компоненту музыкального пассажа как мелодию (фигуру), а аккомпанемент — как фон. Более того, обычно в данный момент времени в качестве фигуры воспринимается только одна мелодия. Следовательно, слушатель проявляет тенденцию к группированию наиболее заметных нот музыкального пассажа таким образом, что они воспринимаются им как фигура, отличная от остального музыкального фона.

Константность восприятия мелодий. Мелодии, исполненные в различных музыкальных ключах, а также на другом музыкальном инструменте или даже разными голосами, сохраняют некоторые неизменные характеристики и продолжают звучать так же или очень похоже. Мелодии сохраняют свою перцептивную идентичность даже если подвергаются системным изменениям, например в тех случаях, когда сочетания нот *транспонируются* в другую тональность (т. е. смещаются вверх или вниз на октаву), благодаря чему связь между тонами разной высоты, звучащими последовательно и образующими мелодию, остается неизменной. Слушая музыку, человек обращает больше внимания на *связи* между звуками разной высоты, чем на абсолютную высоту отдельных звуков. Этим подчеркивается тот факт, что восприятие мелодий основано не на последовательном восприятии ряда отдельных звуков, а на восприятии неизменных, глобальных связей между ними. В этом смысле восприятие музыки — это определенная форма проявления *константности восприятия*, имеющая много общего с феноменом константности, свойственным визуальной системе.

К числу важных для восприятия мелодии глобальных свойств и связей относятся интервалы между отдельными звуками (*spacing*) и порядок следования

изменений высоты соседствующих друг с другом звуков — ее подъемы и падения (Boltz, 1998d). Именно этот уникальный глобальный паттерн частотных пиков и подошв, своего рода *музыкальный контур*, и характеризует мелодию (Deutsch, 1986; Dowling, 1978). На самом деле слушатель, воспринимающий мелодию, скорее всего реагирует на это ее определяющее свойство (Schmuckler, 1999). Интересно отметить следующее: результаты изучения активного восприятия музыки с использованием методов визуализации мозга свидетельствуют о том, что характерная особенность мелодий — музыкальный контур — вызывает специфический паттерн нейронной активности, отличный от того, который соответствует восприятию немелодичной последовательности звуков (Elbert & Keil, 2000; Patel & Balaban, 2000).

Ритмическая организация. На восприятие музыки большое влияние оказывает и скорость предъявления отдельных звуков, различные временные зависимости между отдельными звуками, в том числе и их продолжительность. Большинство музыкальных произведений имеют присущие им временные свойства, например, *ритм*, от которого во многом зависит восприятие слушателем группы звуков как некой перцептивной единицы. Изменяя скорость предъявления звуков и используя *ритмическую близость* (*temporal proximity*), можно легко влиять на их перцептивное группирование. Как было сказано выше применительно к гештальтистскому фактору близости, соседствующие во времени музыкальные звуки воспринимаются как элементы одной и той же перцептивной единицы. Следовательно, ритмически подчеркивая последовательность звуков, например делая остановки между группами звуков, можно существенно влиять на их перцептивную организацию и даже на восприятие мелодии определенного музыкального отрывка (Jones, 1987). Иными словами, паузы между группами звуков могут спонтанно и существенно изменять ритмическую структуру и благодаря этому влиять на восприятие отдельных музыкальных фрагментов, отличных от других фрагментов данного пассажа (Bigand, 1977), что, в свою очередь, может сказываться на восприятии всего контура и мелодии. В принципе ритмическая организация может рассматриваться как аудиальный эквивалент гештальтистского фактора группирования, основанного на близости элементов, хотя в данном случае речь идет о приложении этого фактора к временной близости музыкальных единиц (Monahan et al., 1987; Povel & Essens, 1985).

Цветовая синестезия и музыка

Синестезией (от греческого слова *synesthesia* — соощущение. — Примеч. пер.) называется редкое явление, связанное с восприятием и заключающееся в том, что стимулирование одной сенсорной модальности вызывает не только свойственные ей ощущения, но практически одновременно стимулирует и другую, не связанную с ней сенсорную модальность. Так, вкусовые ощущения, возникающие во рту под воздействием некоторых пищевых продуктов, могут сопровождаться тактильными ощущениями за пределами полости рта, а некоторые звуки способны вызывать определенные вкусовые или цветовые ощущения (Marks, 1975, 1978).

Особая форма синестезии — это *цветовая синестезия* (называемая также *цветовым слухом*), которая проявляется в том, что звуки одновременно вызывают и аудиальное, и визуальное ощущения. Способность вызывать другие сенсорные

переживания, непосредственно не связанные со стимулируемой сенсорной модальностью, особенно свойственны звукам музыки, причем женщины более склонны к ним, чем мужчины.

Несмотря на значительные индивидуальные различия, для связи звук—цвет характерны некоторые общие закономерности и тенденции. Большинство индивидуумов, обладающих цветовым слухом, ассоциируют яркие цветовые тона с очень высокими звуками, а темные цветовые тона — с низкими звуками (Marks, 1978). Классический пример такого восприятия описан в одной из работ: женщина, исполнитель и композитор, и в 23 года, и в 30 лет одинаково реагировала на восприятие высоких и низких звуков — первые ассоциировались у нее со светлыми цветовыми тонами, а вторые — с темными (Langfeld, 1914). Более того, на протяжении всех этих 7 лет подобные ощущения были весьма стабильными. Достойно удивления то, что она «видела» или ощущала совершенно определенные цветовые тона при одном лишь упоминании определенной ноты. Вопрос о происхождении цветового слуха (как и синестезии вообще) остается открытым, но есть свидетельства в пользу того, что способность к нему передается по наследству, и не исключено, что она — генетического происхождения (Goodt, 1999; Baron-Cohen et al., 1996).

Значительно более распространено другое явление, связанное с цветом и возникающее под воздействием музыки, — *цветовые ассоциации*. В данном случае речь идет о том, что музыкальные произведения, обладающие совершенно определенными свойствами (т. е. такая музыка, которую обычно называют «торжественной», «величавой» или «оживленной»), вызывают у слушателей определенные и достаточно стойкие цветовые ассоциации (Cutietta & Haggerty, 1987). Слушатели не «видят» цветового тона, как в случае цветового слуха; в данном случае скорее можно говорить о том, что музыка навевает им мысли об определенном цвете, или о том, что определенный музыкальный отрывок ассоциируется с определенным цветом. Известно, например, что торжественная музыка ассоциируется с красным цветом, величавая — с синим, а оживленная — с желтым. Несмотря на то что способность ассоциировать музыку с определенными цветовыми тонами свойственна людям разных возрастов, происхождение связи музыка—цвет и ее нейрофизиологическая основа пока что неизвестны.

Функциональная роль восприятия музыки

Завершая рассмотрение вопроса о восприятии музыки, обсудим его функциональную роль в контексте функционирования всей аудиальной системы. Музыка, также как и речь, является интегративной составляющей всех человеческих культур и всех обществ. Каждая группа более или менее самостоятельно создала уникальную музыкальную форму, которая является одним из ее основных культурных достижений. Многочисленные примеры различных психологических и физиологических процессов, рассмотренные нами, позволяют высказать предположение о том, что универсальные и нередко чрезвычайно сильные переживания, вызванные восприятием музыки, должны исполнять некоторые адаптивные функции. Более того, выше уже отмечалось, что у большинства индивидуумов в правом полушарии мозга есть определенный участок, специально предназначенный для восприятия музыки. Исходя из исключительной «экономности» нервной системы можно

предположить, что эта анатомическая специализация и ее продукт возникли в результате эволюции для обеспечения некоего адаптивного преимущества, «обслуживающего» некую биологически важную функцию.

Музыка — источник огромного эстетического наслаждения. Сочетание сложных, но упорядоченных паттернов с эмоциями, напряжением, сменами настроений, неопределенностью и даже с неожиданностями, т. е. то, что присуще большинству эстетических переживаний, составляет основу притягательности музыки. Музыку называют «сконструированной неопределенностью» (Smith, 1987). Практически по всем критериям музыка может быть признана высокоразвитой формой искусства и выдающимся достижением человеческой культуры. «Музыка — это искусство звука» (Umetoto, 1990, р. 116). Состоит ли основное предназначение музыки в том, чтобы быть источником наслаждения и способствовать духовному обогащению индивидуумов с помощью манипулирования искусственно создаваемой акустической средой, — этот вопрос пока остается без ответа. Однако если подходить к восприятию музыки с сугубо биологической точки зрения, стоит задуматься над предположением физика Дж. Родерера (Roederer, 1973), суть которого заключается в следующем: способность к восприятию музыки является *побочным продуктом эволюции*, результатом тех высоких требований, которые предъявлялись к аудиальной системе вначале как к детектору удаленности и местоположения, а затем и как к коммуникационной системе.

Восприятие речи

Аудиальная система человека играет решающую роль в такой, казалось бы, естественной и привычной, но по своей сути исключительно сложной форме человеческого поведения, как устная коммуникация посредством языка. Точно и согласованно используя свои аудиальные и голосовые аппараты, мы можем передавать друг другу сложную информацию, объем которой практически не ограничен. Короче говоря, благодаря когнитивной связи между голосовым аппаратом и слухом мы можем генерировать и воспринимать речь. Как и восприятие музыки, *восприятие речи* основано на взаимодействии огромного числа сложных психологических факторов, и в нашу задачу не входит их детальное рассмотрение. Мы расскажем лишь об основных процессах и явлениях, связанных с речевым слухом.

Способность говорить и воспринимать речь — поразительный аспект человеческого поведения. В обычном разговоре мы произносим примерно 180 слов в минуту, и это не требует от нас практически никаких усилий (Kandel, 1995). Чтобы наше восприятие речи было эффективным, мы должны исключительно тонко и быстро различать разные звуки. Например, произнесенное слово представляет собой короткий паттерн звуков, делящийся менее одной секунды. Более того, восприятие речи не прекращается и тогда, когда образующие слова звуки существенно изменяются. Слова сохраняют свою идентичность и правильно воспринимаются даже при весьма неблагоприятных условиях. Так, несмотря на различные акценты, диалекты и особенности голоса говорящего человека, мешающий посторонний шум, периодическое пропадание звука и технические помехи, возникающие в телефонных проводах или в радио- или в телеприемниках, мы вполне адекватно восприни-

маем речевые сигналы. Речь остается понятной даже тогда, когда изменяется большинство физических характеристик речевых звуков, если это изменение не превышает определенного предела. То, что даже при таких условиях речь остается понятной, свидетельствует о том, что ее восприятие — выдающееся перцептивное достижение.

Частотный интервал речевых звуков

Частотный интервал воспринимаемых речевых звуков ограничен скорее анатомией голосового аппарата, нежели потенциальными возможностями слуха. Человеческая речь является результатом функционирования голосовых связок и голосового тракта, образованного полостями рта, гортани и носа. Возникновение звуковых волн является результатом колебания воздуха, вызванного движением голосовых связок. Потенциальная возможность варьирования частоты этих волн зависит от ряда факторов. Возникновение звуков разных частот — результат сочетания индивидуальных особенностей голосового тракта и определенного положения языка, губ, щек и челюстей.

Резонансная частота полости рта, определяемая физической протяженностью голосового тракта и массой голосовых связок, равна у мужчин, женщин и детей примерно 500, 727 и 850 Гц соответственно (Bergeijk, Pierce & David, 1960). Максимальная частота речевых звуков близка к 6500 Гц. Следовательно, речевые звуки занимают примерно одну треть всего частотного интервала, который считается доступным человеческому слуху (т. е. интервала от 20 до 20 000 Гц).

Многие речевые звуки, в том числе многие гласные звуки, — низкочастотные (их частота менее 1000 Гц), т. е. они попадают в разряд звуков, к которым человеческий слух менее чувствителен. Однако частоты большинства согласных звуков, играющих ключевую роль в восприятии речи, лежат в интервале от 1000 до 5000 Гц, т. е. в том интервале частот, к которому люди наиболее чувствительны. Интервал интенсивности генерируемых человеком звуков также узок: разница между самым тихим звуком (шепотом) и самым громким звуком (криком), свойственными человеческому голосу, составляет приблизительно 70 дБ. Энергетические уровни и шепота, и крика далеки от пределов возможностей человеческого слуха.

Фонемы. Чтобы понять нашу способность к тонкому различению слов, необходимо рассмотреть индивидуальные звуки языка. Основная единица речи называется **фонемой** (от греческого слова *phonēta* — звук. — Примеч. пер.). Фонема — это наименьшая единица звуков речи, благодаря которой можно отличить одно слово от другого (табл. 14.1).

Сами по себе фонемы лишены смысла, а некоторые из них вообще не произносятся (например, такая фонема, как *ng* в слове *sing*), но в сочетании с другими фонемами они образуют слоги и слова. Например, слово *pet* образовано тремя фонемами: [p], [e] и [t]. Заменив за один раз только одну из этих фонем другими, можно получить целый ряд новых слов, имеющих совершенно иное значение, чем исходное слово, и отличающихся от него только одной фонемой (*pit, pat, pot, put, pen, let*).

Гласные и согласные. В зависимости от того, как именно используется голосовой аппарат при произнесении звуков, образующих фонемы, звуки подразделяются

Таблица 14.1
Фонемы базового американского английского языка^{*}

Гласные	Согласные	
<i>ee</i> как в <i>heat</i>	<i>t</i> как в <i>tee</i>	<i>s</i> как в <i>see</i>
<i>I</i> как в <i>hit</i>	<i>p</i> как в <i>pea</i> ,	<i>sh</i> как в <i>shell</i>
<i>e</i> как в <i>head</i>	<i>k</i> как в <i>key</i>	<i>h</i> как в <i>he</i>
<i>ae</i> как в <i>had</i>	<i>b</i> как в <i>bee</i>	<i>v</i> как в <i>view</i>
<i>ah</i> как в <i>fater</i>	<i>d</i> как в <i>dawn</i>	<i>th</i> как в <i>then</i>
<i>aw</i> как в <i>call</i>	<i>g</i> как в <i>go</i>	<i>z</i> как в <i>zoo</i>
<i>u</i> как в <i>put</i>	<i>m</i> как в <i>me</i>	<i>zh</i> как в <i>garage</i>
<i>oo</i> как в <i>cool</i>	<i>n</i> как в <i>no</i>	<i>l</i> как в <i>law</i>
<i>ʌ</i> как в <i>ton</i>	<i>ŋ</i> как в <i>sing</i>	<i>r</i> как в <i>red</i>
<i>uh</i> как в <i>the</i>	<i>f</i> как в <i>fee</i>	<i>y</i> как в <i>you</i>
<i>er</i> как в <i>bird</i>	<i>θ</i> как в <i>thin</i>	<i>w</i> как в <i>we</i>
<i>oi</i> как в <i>toil</i>	<i>ch</i> как в <i>church</i>	<i>g</i> как в <i>gin</i>
<i>au</i> как в <i>shout</i>		
<i>ei</i> как в <i>take</i>		
<i>ou</i> как в <i>tone</i>		
<i>ai</i> как в <i>night</i>		

* Базовый американский английский — это диалект, на котором разговаривают жители штатов, расположенных на Среднем Западе и на Западе Соединенных Штатов. Некоторые фонемы других региональных диалектов (например, южных штатов) могут отличаться от представленных в таблице. Фонемы базового американского английского языка включают около 16 гласных и 24 согласных звука.

Некоторые фонемы представлены буквами латинского алфавита, а некоторые — специальными знаками.

Источник. Denes & Pinson, 1973.

ся на гласные и согласные. В произнесении гласного звука «задействованы» голосовые связки, резонанс полостей гортани и открытый рот. Произнося в слух такие гласные звуки, как *a*, *e*, *i*, *o* и *u*, нельзя не обратить внимания на то, что форма рта и положение губ при этом различны. При произнесении гласных положение языка, губ и мягкого нёба таково, что воздух проходит через полость рта, не встречая препятствий. Гласные звуки более продолжительны по звучанию, чем согласные, и громче их, хотя громкость гласных изменяется в широких пределах. Частота почти всех гласных звуков ниже 3000 Гц, а частота таких согласных звуков, как, например, *ch* или *s*, превосходит 3000 Гц.

Спектограмма. За легкостью, с которой мы воспринимаем речь, скрывается исключительно сложный механизм. Многие речевые звуки — это сложные паттерны интенсивности и частот, изменяющиеся во времени. Графическое изображение, запись этих изменений, имеющих место во время произнесения звука, называется спектограммой. Спектограмма дает графическую картину энергии, создаваемой

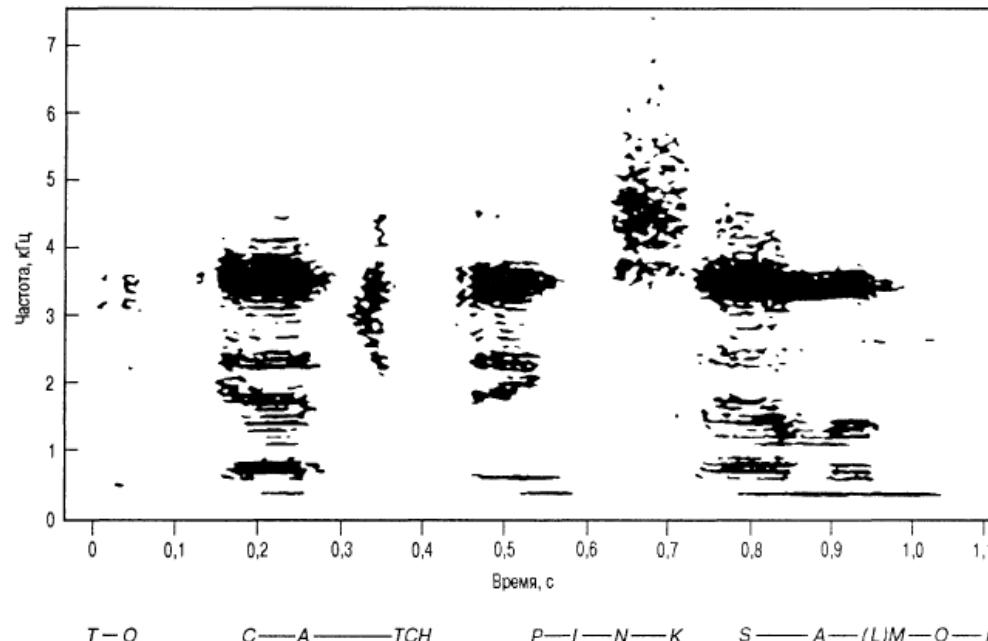


Рис. 14.7. Спектограмма, записанная во время произнесения фразы: *To catch pink salmon* («Поймать молодого лосося»). (Источник: Mattingly, 1972, p. 328)

речью или любой последовательностью звуков. Пример типичной спектограммы представлен на рис. 14.7. На спектограмме представлены три компонента речи. На абсциссе отложено время, на ординате — частота, а концентрация темных пятен, называемых **формантами**, отражает изменение уровня частоты во времени.

В определенные временные интервалы спектограмма не фиксирует никакой энергии. Однако эти периоды «молчания» не обязательно свидетельствуют о паузах между словами во время признания данной фразы. В действительности, разговаривая, мы не делаем пауз между словами. Как правило, между интервалами на спектограмме и паузами между словами во время разговора связь очень невелика. (Ниже мы вернемся к обсуждению этого вопроса.)

Короткая пауза между следующими друг за другом слогами может служить важным признаком перцептивного группирования звуков беглой речи, хотя между этой паузой и восприятием отдельных слов и нет прямой разницы. По мнению автора работы (Moore, 1989), непродолжительные паузы помогают слушателю отличить друг от друга такие фразы, как *light housekeeper* и *lighthouse keeper* или *blue berry* и *blue-berry* («нерадивая домоправительница» и «смотритель маяка» или «синяя ягода» и «черника»). Обратите внимание и на то, как изменяется смысл слова в зависимости от того, на каком слоге делается ударение: если в слове *invalid* ударным является первый слог, то слово воспринимается как существительное, обозначающее хронически больного или физически неполноценного человека, а если ударение сделано на втором слоге, — то как прилагательное, характеризующее нечто незаконное или недостоверное.

Восприятие неразборчивой речи

Понимание механизма речевого слуха — это нечто значительно большее, чем анализ восприятия звука. Когнитивно-интегративный механизм восприятия речи необыкновенно сложен. Более того, мы продолжаем воспринимать смысл сказанного даже тогда, когда сама речь замедлена или нарушена. В этом разделе мы подробно рассмотрим этот вопрос, для чего расскажем о таких экспериментах, процедурах и условиях восприятия речи, в которых различные ее аспекты либо вовсе отсутствовали, либо были весьма существенно искажены или смазаны специально для того, чтобы можно было определить их влияние на ее разборчивость.

«Срезание частот». Один из способов ухудшения разборчивости речи включает в себя «отфильтровывание» из нее целых интервалов частот. Этот способ, известный под названием «*срезание частот*», описан в ставшей классической работе Френча и Стейнберга (French, Steinberg, 1947). Испытуемые прослушивали в записи слова, из которых были полностью удалены целые интервалы частот — либо меньше 1900 Гц, либо больше. После «отфильтровывания» частот выше 1900 Гц примерно 70 % слов оставались разборчивыми. Аналогичный результат был получен и после удаления всех звуков с частотой ниже 1900 Гц. Следовательно, частоты ниже и выше 1900 Гц вносят одинаковый вклад в понимание смысла слов, а это значит, что в определенных пределах стимульная информация, критически важная для восприятия речи, не «привязана» ни к одному конкретному частотному интервалу.

«Срезание частот» иллюстрирует своего рода определенный компромисс между остающейся и удаляемой информацией. Исключение высоких частот сильнее сказывается на восприятии согласных звуков, чем гласных, а «отфильтровывание» низких частот заметнее сказывается на восприятии гласных звуков, чем согласных. Следовательно, нет необходимости ни во всех высокочастотных, ни во всех низкочастотных звуках. Остается лишь удивляться тому, какой узкий интервал частот достаточен для восприятия смысла слов.

Пропущенные звуки и речевой контекст. Как правило, во время любой беседы отдельные звуки или слова бывают не слышны из-за разных посторонних звуков, таких, например, как уличный шум, шаги, звонки в дверь и хлопанье дверьми, разговоры других людей или кашель. Однако в большинстве случаев подобные лакуны остаются не замеченными слушателем, который сам «вставляет» недостающие звуки. Это обстоятельство имеет чрезвычайно важное значение для понимания механизма речевого слуха: восприятие непрерывной речи зависит не только от совершившего конкретной акустической стимуляции, имеющей место в каждый данный момент времени. Оно зависит также от *предчувствий* и *ожиданий* того, какой должна быть эта стимуляция, основанных на когнитивном «каркасе» (*framework*), созданном предыдущими и последующими звуками. Следовательно, источником дополнительной информации для восприятия речи является **лингвистический контекст**, в котором воспринимаются звуки.

Значение контекста для восприятия речи подтверждается следующим примером феномена, называемого **эффектом восстановления фонемы** (Bashford, Rieger & Warren, 1992; Warren, 1970; Warren & Warren, 1970). Слушателям предъявлялись

предложения, аналогичные этому: *It was found that the (eel was on the orange* («Было установлено, что апельсин покрыт (ожурой»). Вместо отсутствующего звука (фонемы), обозначенного в тексте скобками, испытуемые слышали посторонний звук — громкий кашель. Иными словами, кашель слышался непосредственно перед звуком *eel*. Прослушав это и аналогичные ему предложения, испытуемые сообщили экспериментатору, что перед звуком *eel* скорее слышали не кашель, а звук фонемы, соответствующей лингвистическому контексту. Иными словами, они перцептивно восстановили пропущенную фонему [r] и услышали слово *peel* (кожура). Это значит, что восприятие отсутствующей фонемы слова *peel* было предопределено контекстом, созданным последним словом в этом предложении. Другими словами, которые использовались для завершения этого предложения и изменили контекст, были *axle* (колесная мазь) и *shoe* (туфля), а кашель вместо первых фонем слышался в словах *whee* (колесо) и *heel* (каблук) соответственно, т. е. фонемическое восстановление соответствует определенному лингвистическому контексту.

Еще раз обращаем ваше внимание на то, что восприятию пропущенного звука способствуют слова, следующие *после* кашля. Это значит, что слушатель «придерживает» неполную информацию до тех пор, пока контекст окончательно не прояснится. Интересно отметить, что хотя отсутствующий звук и его «местоположение» были отчетливо «слышны», слушатели плохо понимали, какой именно звук отсутствует. Когда же пропуск фонемы обозначался не кашлем, а паузой, слушатели без труда определяли местоположение последней.

Контекст влияет также и на восприятие отдельных слов и даже на восприятие меньших единиц речи, таких, например, как гласные звуки. Поллак и Пикетт записали беседу участников эксперимента, ожидавших тестирования, и позднее предъявили им записи отдельных слов и коротких фраз, взятых из их беглого разговора (Pollack & Pickett, 1964). Когда испытуемые слышали только отдельные слова, они распознавали их гораздо хуже, чем когда у них была возможность услышать еще несколько связанных с ними слов. Влияние контекста на восприятие фрагментов слова иллюстрируется данными работы (Rakerd, 1984): изолированные гласные звуки воспринимаются совершенно иначе (т. е. менее лингвистично), чем гласные звуки, услышанные в присутствии соседствующих с ними согласных звуков. Это явление называется **консонантным контекстом**.

Неясность речи: недостаток контекста. Контекст способен также уменьшить вероятность искаженного понимания беглой разговорной речи или ее недопонимания. Подобное случается тогда, когда акустический стимул может быть истолкован двояко или когда одинаково воспринимаемые на слух единицы речи имеют совершенно разный смысл (Garrett, 1982). Один и тот же акустический стимул может быть воспринят по-разному в зависимости от того, в каком контексте он возникает. Например, слова детской песенки *I scream, you scream, we all scream for ice cream* («Я требую мороженого, ты требуешь мороженого, мы все требуем мороженого») воспринимаются слушателем в соответствии с их контекстом. А теперь сравните слово *euthanasia* («эвтаназия») с выражением *youth in Asia* (юность в Азии), которое фонетически почти идентично ему. Без соответствующего контекста ошибка при их восприятии на слух вполне возможна.

В качестве примера неверного восприятия на слух, скорее всего, в результате недостатка контекста нередко приводится забавный случай, который произошел с одной женщиной и был описан фельетонистом газеты *The New York Times* Уильямом Сэфайром (Safire, 1979): при первом прослушивании песни группы *Beatles* «*Lucy in the Sky with Diamonds*», она вместо слов *the girl with kaleidoscope eyes* услышала слова *the girl with colitis goes by*. В данном случае объединение звуков в отдельные слова явилось следствием контекста (или отсутствием надлежащего контекста).

Позднее Сэфайр пересказал случай, о котором рассказала ему писательница Сильвия Райт и который связан с контекстуальной ошибкой в восприятии названия церковного гимна *Gladly the Cross I'd Bear*. Неправильно поняв его название, дети радостно пели в церкви о большом звере по имени Глэдли, страдающем дефектом зрения — страбизмом (Safire, 1994). Примерно то же самое в результате отсутствия надлежащего контекста (или, возможно, под влиянием сиюминутного контекста, навязанного себе самим слушателем) произошло и с музыкальным произведением, написанным в гораздо более позднее время: в ходе проверки знаний о музыке и композиторах один ученик начальной школы сказал, что Джордж Гershвин написал *Rap City in Blue* (Root, 1994)¹.

Интерес к подобным казусам, возникающим при восприятии устной речи и связанным с контекстом, привел к появлению обширной коллекции, собранной из разных источников. С легкой руки Сильвии Райт они называются *mondegreens*. Писательница предложила этот термин в 1954 г. в память о своем детском неверном понимании некоторых строф шотландской народной баллады *The Bonny Earl of Moray*. В течение многих лет она вместо слов *They hae slain the Earl of Moray, and laid him on the green* слышала слова *They have slain the Earl of Moray and Lady Mondegreen*. Имея вербально неоднозначный контекст (во всяком случае, ребенку он показался таковым) и будучи романтически настроенной девочкой с богатым воображением, юная Райт придумала леди или, возможно, барышню, разделившую с убитым графом Морреем его участь. (Более подробно о собрании *mondegreens* рассказало в работах Pinker, 1994; Edwards, 1995).²

Бланкирование речи. Результат, аналогичный эффекту перцептивного заполнения пробелов в устной речи благодаря контексту, достигается и тогда, когда ее фрагменты «удаляются» экспериментатором, который периодически то включает, то выключает звук, или систематически «замазывает» им попеременным включением и выключением маскирующего шума. Такой способ прерывания устной речи называется **бланкированием речи**. Общая тенденция, проявляющаяся при различных условиях бланкирования, графически представлена на рис. 14.8.

¹ На самом деле произведение Гershвина, о котором идет речь, называется *Rhapsody in Blue*. — Примеч. пер.

² О подобном рассказывал и Зиновий Гердт: «Когда я был маленький, и "Интернационал" пели все, и все слова знали все, и горели взоры, и до мировой справедливости было рукой подать, а слово "всепринят" было мне недоступно, — я искренне, с чувством скорой всеобщей правды и добра пел: "С Интернационала-а-алом вон пряников в рот людской". И я видел этот рот, этот вон и, кажется, даже добродушное лицо возницы» (из кн.: Зяма — это же Гердт! Н. Новгород: ДЕКОМ, 2001. С. 190–191. — Примеч. пер.)

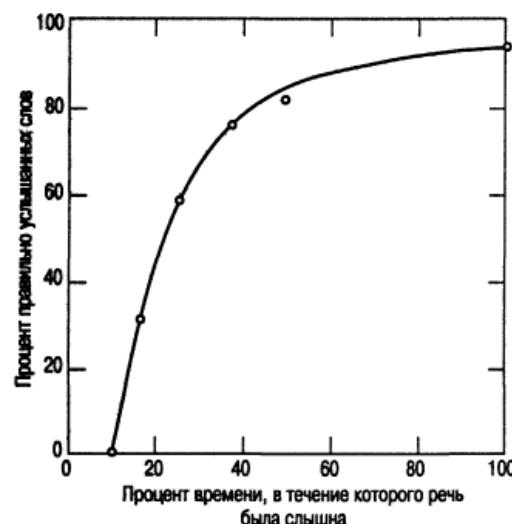


Рис. 14.8. Зависимость правильности восприятия речи от условий ее бланкирования
Звук включался и выключался 9 раз в секунду. Чтобы хорошо понять смысл сказанного, достаточно, чтобы речь была слышна в течение очень непродолжительного времени. (Источник: Miller, 1947)

Как следует из рис. 14.8, заметное изменение в доступности речи для понимания наступает тогда, когда она не слышна в течение половины всего времени эксперимента (звук включался и выключался 9 раз в секунду), однако даже при этих условиях утраченными оказались лишь 15 % слов. Следовательно, даже если аудиальная система слышит речь только в течение половины времени, достигается вполне удовлетворительная степень понимания последней.

Экспериментальное подтверждение

Бланкирование речи

Эффекта бланкирования речи можно добиться с помощью радио. Слушая по радио последние известия, быстро регулируйте громкость таким образом, чтобы чередовались тишина и слышимая речь. Несмотря на то что вы сами постоянно мешали восприятию речевого потока, вы с удивлением поймете, что уловили много слов. Разумеется, окончательный результат, т. е. то, насколько вы поняли смысл сказанного по радио, будет зависеть от того, насколько быстро и часто вы включали и выключали звук, а также от продолжительности пауз и звучания речи.

Восприятие речи обладает удивительной устойчивостью к разрушению. Речь остается понятной даже на фоне постороннего шума и даже тогда, когда из нее исключаются значительные фрагменты лингвистических элементов, включая фонемы и целые интервалы частот, т. е. тогда, когда условия ее восприятия — и это вполне понятно — далеки от идеальных. Более того, то обстоятельство, что определенный уровень восприятия речи сохраняется вопреки разнообразным звукам, воздействующим на слушателя, включая и акустические эффекты, связанные с возрастом говорящего, с его полом, диалектом и даже с его эмоциональным состоянием, свидетельствует о том, что заключенная в речи информация имеет большой запас прочности. Именно поэтому даже при искажении или исключении некоторых свойственных речи отличительных особенностей в ней остается еще достаточно

признаков для того, чтобы донести до слушателя заложенную в ней информацию. Как отмечает Мур (Moore, 1989, p. 281), «Это дает нам огромные практические преимущества. Если бы восприятие речи было возможно только при едва ли не идеальной передаче звука от говорящего к слушателю, речевая коммуникация в большинстве реальных ситуаций была бы чрезвычайно затруднена. Природа создала такой процесс речевой коммуникации, который способен функционировать в широком диапазоне неблагоприятных условий».

Восприятие речи: основные аспекты и дискуссионные вопросы

Читателю уже должно быть ясно, что способность к восприятию речи — экстраординарное явление. Всякий раз, слыша определенную последовательность звуков, образующих устную речь, мы практически сразу же и без усилий распознаем содержащийся в них когнитивный сигнал. Более того, мы воспринимаем смысл устной речи даже тогда, когда ее звуки весьма существенно изменены или искажены, а некоторые элементы речи и вовсе отсутствуют. В этом разделе мы рассмотрим некоторые общие положения, которые помогут составить представление о том, каким образом стимуляция звуками, выраженным голосом, воспринимается нами как речь.

Восприятие слов

Сейчас мы уже можем попытаться ответить на главный вопрос, касающийся понимания восприятия речи: каким образом мы, слыша устную речь, представляющую собой последовательность звуков, воспринимаем ее как состоящую из отдельных слов даже тогда, когда сами по себе физические сигналы не дают нам достаточных оснований для этого, т. е. для того, чтобы надлежащим образом разделить вербальную стимуляцию на отдельные слова? Мы воспринимаем слова отдельно друг от друга, но то, что они действительно отделены друг от друга, не очевидно: нет никаких физических признаков, которые соответствовали бы воспринимаемому нами разделению. Более того, как уже отмечалось выше, на спектограммах нет пробелов, которые бы соответствовали тому, что мы воспринимаем как границы между словами. Иначе говоря, эти границы не имеют физической презентации в виде пауз в речевом потоке, стимулирующем нашу аудиальную систему. Напротив, фонетические сегменты, образующие речь, физически сливаются друг с другом и доходят до слушателя в виде непрерывного потока акустических сигналов.

Человек, к которому обращаются на незнакомом языке, сразу же сталкивается с проблемой перцептивного выделения отдельных слов. Иностранный язык воспринимается им как быстрый, непрерывный поток звуков. Неискушенный слушатель не знает даже того, какой набор звуков соответствует отдельным конкретным словам, и не может сказать, основываясь только на этих звуках, где заканчивается одно слово и начинается другое. Воистину прав Джузук (Jusczyk, 1986, p. 27–3): «Учитывая непрерывность речевого потока, возможно, не следует удивляться трудностям, которые иностранцы испытывают при определении границ между слова-

ми, и тому, что они жалуются на слишком быструю речь англоговорящих людей. Скорее, следует удивляться тому, что сами носители английского языка *действительно слышат этот непрерывный сигнал как совокупность отдельных слов*.

Разговорная речь — это сочетание отдельных слов, и одним из важнейших условий, определяющих восприятие непрерывного потока звуков (т. е. разговорной речи) как сочетания отдельных слов, следует признать *знакомство* слушателя с этими звуками. Воистину знание языка, особенно знакомство с его звуками, помогает нам воспринимать физически отсутствующую границу между словами. Эти границы слышны, по крайней мере хотя бы частично, потому что нам знакомы определенные звуки, образующие слова. И чем лучше слушатель знает речевые звуки данного языка, тем легче эти звуки воспринимаются им как отдельные слова. Точно так же восприятию отдельных слов помогает и знакомство с голосом говорящего. Известно, что испытуемые значительно лучше распознавали отдельные слова на фоне шума в том случае, если их произносил знакомый им голос (Nygaard et al., 1994, см. также: Palmer et al., 1993). Следовательно, знакомство слушателя с паттерном речи говорящего способствует тому, что он лучше понимает произносимые им слова. И последнее. Как уже отмечалось выше, *эффект фонемического восстановления*, т. е. то, что мы слышим звуки в контексте других звуков, также помогает нам воспринимать границы между словами.

Уникальность речи

Является ли речь чем-то уникальным? Воспринимает ли аудиальная система речь как некую особую форму стимуляции, отличную от других окружающих нас звуков, имеющую свои собственные функциональные особенности и требующую в связи с этим специфических нейронных механизмов и структур для обработки содержащейся в ней информации? Или речь — всего лишь культурное явление, некая форма сложной акустической стимуляции, воспринимаемой и обрабатываемой точно так же, на основании тех же самых нейронных механизмов, которые лежат в основе восприятия и анализа информации, содержащейся в других сложных стимулах невербального характера, которые присутствуют в окружающей нас среде? Ни один из этих подходов не находит безоговорочной поддержки со стороны ученых-практиков и теоретиков, хотя точка зрения, заключающаяся в том, что язык не является исключительно культурным феноменом, а базируется на биологической основе, имеет много сторонников. Есть немало аргументов «за» и «против» обеих этих трактовок, и вопрос об уникальном статусе речи остается открытым.

В этом разделе мы рассмотрим вопрос о том, возможно ли, что восприятие речи существенно отличается от восприятия неречевых звуков и что существуют особые механизмы распознавания и анализа речи. Кроме того, мы также рассмотрим точку зрения о том, что восприятие речи — это результат функционирования определенной нейронной системы (или модуля), «специализирующейся» на извлечении лингвистического смысла из передающих этот смысл звуков. Начнем же мы с краткого рассказа о моторной теории речи.

Моторная теория речи базируется преимущественно на наблюдении, суть которого заключается в том, что между восприятием звуков речи и тем, как они произносятся голосовым аппаратом, существует тесная связь. Иными словами, «вос-

приятие речевых звуков в той или иной степени определяется способом, каким именно мы их генерируем» (Liberman et al., 1967a, p. 70; Liberman & Studdert-Kennedy, 1978). Подобная трактовка восприятия речи называется **моторной теорией**, поскольку, с точки зрения ее сторонников, слушатели используют моторно-артикуляционные жесты, обычно сопровождающие разговор.

Приверженцы моторной теории исходят из того, что для восприятия речи способ ее «производства» имеет решающее значение: люди каким-то образом вынуждены использовать собственные моторно-речевые системы для восприятия речи других. Слушатель потому способен воспринимать речь, что ему известно, каким образом генерируются речевые звуки. В соответствии с моторной теорией, речь, безусловно, уникальна, поскольку, по мнению ее сторонников, восприятие речи связано с ее генерированием «специализированной» моторно-речевой системой. (Обращаем ваше внимание на следующее: моторная теория вовсе не считает, что для восприятия речи слушатель должен как-либо открыто использовать свою способность генерировать ее, например разговаривать с самим собой. Напротив, сторонники этой теории подчеркивают, что восприятию речи предшествует некий весьма тонкий, неосознанный и «беззвучный» анализ способа ее генерирования.)

Категориальная перцепция. Создание гипотезы, суть которой заключается в том, что речь отличается от других звуковых стимулов, отчасти связано с таким феноменом, как **категориальная перцепция**. Этим термином обозначается ситуация, при которой способность к различению объектов, принадлежащих к *одной* категории, значительно уступает различительной способности по отношению к объектам *разных* категорий (Juszcuk, 1986). Применительно к восприятию речевых звуков категориальная перцепция означает, что два разных звука, например таких, как согласные [p] и [b] (или одинаково произнесенные согласные [d] и [t]), легче отличить друг от друга, чем разные формы [p] или разные формы [b].

При произнесении таких фонетических консонант, как [p] и [b], голосовой аппарат совершает практически одинаковые действия. При произнесении обоих звуков губы сначала смыкаются, потом размыкаются, выпуская воздух, и выбирируют голосовые связки (эта вибрация называется *озвончением*). Однако если при произнесении звука [b] голосовые связки начинают выбиривать практически одновременно с выпусканием воздуха, то при произнесении звука [p] эта вибрация происходит спустя примерно 50–60 мс после того, как выездух уже вышел. Время, отделяющее выход воздуха от вибрации голосовых связок, или озвончения, называется **временем, необходимым для возникновения звукового сигнала** (*voice-onset time – VOT*). В данном контексте наиболее важным для нас является то, что слушатели используют этот параметр как признак, позволяющий им отличить звук [b] от звука [p].

В качестве примера распознавания согласных звуков (с использованием синтезатора или созданных компьютером речевых звуков) рассмотрим условия, при которых такой параметр, как время, необходимое для возникновения звукового сигнала, систематически изменяется на незначительную, но постоянную величину, а задача испытуемого в каждом конкретном эксперименте определить, какой именно согласный звук он слышит, например [b] или [p]. В данном случае испытуемым предъявлялся звук [b] (поскольку мы начинаем с одновременного выпуск-

кания воздуха и озвончения). Несмотря на небольшие инкрементальные изменения времени, необходимого для возникновения звукового сигнала, испытуемый будет по-прежнему воспринимать звук [b], и это будет продолжаться до тех пор, пока время не достигнет определенного значения — *фонетической границы*, т. е. точки, при которой фонема [b] внезапно превратится в фонему [p]. Следовательно, *фонетическая граница* — это время, необходимое для возникновения звукового сигнала, которое изменяет воспринимаемую фонему. Обратите внимание на то, что, несмотря на значительные изменения времени, необходимого для возникновения звукового сигнала по обе стороны границы, никаких перцептивных изменений не происходит. Напротив, испытуемый воспринимает только два звука — либо звук [b], либо звук [p], в зависимости от того, по какую сторону от фонетической границы лежит время, необходимое для возникновения звукового сигнала. В этом смысле фонетическая граница представляет собой «водораздел», выраженный с помощью времени, необходимого для возникновения звукового сигнала, и отделяющий восприятие одной фонемы от другой.

Для тех, кто полагает, что речевые звуки уникальны, категориальная перцепция является свидетельством того, что, когда изменение времени, необходимого для возникновения звукового сигнала таких фонетических звуков, как [b] и [p], достигает критической точки, т. е. *фонетической границы*, «в дело вступает» специальный «процессор» речи или механизм ее восприятия. В результате определенное время, необходимое для возникновения звукового сигнала, вовлекает в действие и определенный механизм, благодаря которому фонемы воспринимаются как разные.

Категориальная перцепция, иллюстрируя тесную связь между восприятием некоторых речевых звуков и способом их произнесения, является также и аргументом в пользу *моторной теории восприятия речи*. Согласно категориальной перцепции, восприятие речи теснейшим образом связано с артикуляцией. То, что мы воспринимаем звуки по принципу «либо—либо» (например, либо [b], либо [p]) находится в полном соответствии с тем, как мы их произносим. В обычной речи время, необходимое для возникновения звукового сигнала, может варьировать в очень широких пределах, но мы продолжаем слышать одну и ту же согласную — [b]. Затем в точке, соответствующей фонетической границе, когда время, необходимое для возникновения звукового сигнала, достигает критического значения, восприятие резко изменяется и мы слышим звук [p]. Следовательно, определенные изменения голосовой артикуляции вызывают соответствующие изменения восприятия.

Категориальная перцепция представляет собой феномен, проявляющийся не только в отношении речевых звуков. Аналогичные эффекты наблюдались и при восприятии такого неречевого звука, как жужжание (Miller et al., 1976). Возможно, самым серьезным испытанием для предположения, суть которого заключается в том, что эта форма категориальной перцепции связана со специфическим механизмом обработки речевой информации, является следующий факт: аналогичная форма категориальной перцепции свойственна и некоторым видам животных, например обезьянам (Kuhl & Padden, 1993; Morse & Snowden, 1975), шиншиллам, (Kuhl & Miller, 1975), японскому перепелу (Kluender et al., 1987) и собакам (Adams & Molfese, 1987), хотя, как известно, животные лишены возможности пользоваться речью.

Нейронный механизм восприятия речи. Известны и физиологические обоснования гипотезы о том, что речь отличается от других звуков. Их сторонники исходят из существования специальных нейронных структур и механизмов, отличающих речь от всех других форм аудиального стимулирования. Ниже описаны некоторые физиологические концепции.

Детекторы отличительных лингвистических признаков. Имеются ли в человеческом мозге специализированные нейроны — нейронные детекторы речи, — «ответственные» исключительно за восприятие звуков человеческой речи? Поиск подобных нейронов основан на предположении, что специфические детекторы отличительных лингвистических признаков находятся в мозге. Полагают, что эти тонко настроенные нейроны реагируют исключительно на специфические характеристики и отличительные признаки речевой стимуляции, например на время, необходимое для возникновения звукового сигнала. Одним из способов доказательства их существования является метод *селективной адаптации*, с помощью которого можно вызвать «утомление», или адаптацию, «лингвистических» нейронов, существование которых предполагается, с помощью контролируемой избыточной стимуляции. Если существует специфический детектор какого-либо отличительного признака речи, своегоенного, например, фонеме [t], то после многократного повторения этого звука лингвистический детектор «утомится», или адаптируется, и вероятность того, что испытуемый услышит его, уменьшится.

В одном из экспериментов, основанных на селективной адаптации, авторы использовали синтезированные компьютером речевые звуки, включая и пару согласных фонем, хотя и близких по звучанию, но вполне различимых, — [t] и [d] (Eimas & Corbit, 1973). (Исследователи синтезировали и другие пары согласных фонем, но в качестве иллюстрации мы рассмотрим только одну из них — пару [t] и [d].) Они также синтезировали с помощью компьютера серию промежуточных речевых звуков для пары согласных фонем [t] и [d], которые звучали достаточно неопределенno, так что речевой сигнал можно было воспринять и как [t], и как [d]. Иными словами, наряду с парой совершенно определенных согласных звуков [t] и [d] они синтезировали речевые звуки, слышимые на *лингвистической границе* между двумя различными согласными звуками, причем этот неопределенный звук скорее должен был восприниматься как [t], чем как [d].

В течение 2 минут испытуемым несколько раз предъявлялся звук [d]. Это делалось для того, чтобы селективно адаптировать предполагаемый детектор, настроенный на восприятие лингвистических отличительных признаков согласного звука [d]. (Эта процедура аналогична той, с помощью которой мы демонстрировали существование отрицательных последовательных образов и которая описана нами в главе 5.) Когда по завершении адаптационной фазы испытуемому предъявляли неоднозначный звук, промежуточный между [t] и [d], который он ранее воспринимал либо как [t], либо как [d], при многократном повторении этого звука уже не воспринимал его как неопределенный: после селективной адаптации к согласному звуку [d] испытуемый гораздо чаще воспринимал неоднозначный звук, синтезированный из звуков [t] и [d], как [t]. Подводя итог, можно сказать следующее: результаты этого эксперимента свидетельствуют о том, что многократное предъявление лингвистического стимула селективно «утомляет» предполагаемый детектор, чувст-

вительный к одному из отличительных признаков данного стимула, результатом чего является снижение активности детектора и восприятия стимула.

Однако это открытие не было сразу и безусловно воспринято научным сообществом. Гипотеза о том, что нейронную основу механизма восприятия речи составляют детекторы специфических лингвистических признаков, была подвергнута всесторонней проверке. Наиболее серьезная проблема заключается в том, что помимо речевых звуков селективную адаптацию легко вызывают и другие, неречевые звуки (Sawusch & Jusczyk, 1981). Это значит, что селективная адаптация не следствие каких-либо фонетических или лингвистических особенностей вызывающих ее акустических стимулов. Селективная адаптация скорее может быть результатом «утомления» детекторов, воспринимающих физические частоты стимула, адаптация к которому изучается, нежели его, стимула, специфических или лингвистических отличительных признаков. Иными словами, хотя сам факт существования нейронов — детекторов специфических признаков и вполне вероятен, они, скорее всего, участвуют не только в обработке информации, содержащейся в речевых звуках, но и в восприятии аудиальной стимуляции вообще. Хотя мы и не отрицаем роли детекторов отличительных признаков в восприятии речи (Samuel, 1986, 1989; Naatanen et al., 1996), не исключено, что существуют и другие механизмы обработки информации, заключенной в речи. В следующем подразделе мы рассмотрим альтернативу детекторам лингвистических признаков — *речевой модуль*.

Восприятие речи и речевая сенсорная модальность. Как и все аудиальные стимулы, звуки речи образованы сигналами, имеющими различные физические свойства (т. е. разную интенсивность, частоту, сложность и продолжительность). Чтобы «раскрылась» содержащаяся в речевых звуках информация, они, как и все сложные символы, должны претерпеть некую специальную обработку. Восприятие речи требует от слушателя не только извлечения информации о наличии тех или иных звуков или об их местоположении, но и раскрытия смысла — *семантического послания*, закодированного в звуках. Из этого следует, что восприятие речи отличается от восприятия других форм аудиальной стимуляции и потому требует своего собственного, специального механизма обработки информации.

Это обстоятельство и явилось предпосылкой создания на биологической основе единой теории, согласно которой нервная система человека имеет специальный «процессор» — **речевую сенсорную модальность — фонетический, или речевой, модуль**, предназначенный исключительно для обработки информации, содержащейся в звуках, идентифицированных как речь. Не исключено, что самым убедительным доказательством существования специфической речевой сенсорной модальности являются результаты тех исследований, авторы которых показали, что одни и те же акустические сигналы обрабатываются и воспринимаются по-разному в зависимости от того, принимает ли их слушатель за речь или за информацию другого рода. Иными словами, стратегия и критерии, к которым прибегают слушатели для оценки звуков, воспринимаемых как речь, отличаются от стратегии и критериев, используемых при восприятии аудиальных стимулов иного рода (Best, Morrongiello & Robson, 1981; Remez et al., 1981).

Помимо того, что одни и те же речевые звуки могут при разных обстоятельствах восприниматься и как речь, и как неречевая стимуляция, при определенных усло-

виях один и тот же физический стимул одновременно способен возбуждать обе сенсорные модальности — и неречевую (психоакустическую), и речевую (фонетическую). Подобное одновременное восприятие звуковых сигналов в качестве речи и в качестве неречевой (акустической) стимуляции называется **двойственным восприятием** (*duplex perception*). Полагают, что двойственное восприятие отражает различия, существующие в психоакустическом и лингвистическом механизмах восприятия одного и того же стимула.

Уолен и Либерман провели эксперимент, в котором испытуемым предъявляли синтезированные с помощью компьютера сложные звуки, воспринимавшиеся при относительно низких уровнях интенсивности как [da] и [ga], а при более высоких уровнях интенсивности вызывавшие двойное восприятие (Whalen & Liberman, 1987). Иными словами, восприятие акустического сигнала зависит от уровня его интенсивности, и при увеличении последнего испытуемые одновременно слышали не только акустические сигналы, воспринимавшиеся ими как [da] и [ga], но и неречевой свистящий звук. По мнению авторов работы, приоритет принадлежит речевой сенсорной модальности и неречевая сенсорная модальность «вступает в действие» только тогда, когда интенсивность сигнала достигает достаточно высокого уровня: «двойственное восприятие подтверждает гипотезу о том, что приоритет в обработке входящих сигналов принадлежит фонетической модальности, которая сначала воспринимает их специфические лингвистические свойства, а затем передает “остаток” неречевой сенсорной модальности, воспринимающей его как свист. Подобная приоритетность отражает исключительную биологическую значимость речи» (р. 171).

Вопрос о существовании специфической сенсорной модальности или отдельного речевого модуля, предназначенных для обработки речевой стимуляции, остается открытым. Однако у нас есть достаточно оснований считать, что приобретение навыков восприятия речи начинается в детстве и происходит постепенно. Хотя младенцы сначала воспринимают только физические или психоакустические свойства речи, они демонстрируют предрасположенность к различению звуков, соответствующих различным фонемам, и к обучению тем конкретным фонемам, которые важны для коммуникации (Friederici & Wessels, 1993; Kuhl, 1983; MacKain et al., 1983).

Овладевая языком, маленькие дети в определенный момент начинают принимать во внимание фонологическую (язык—звук) структуру и другие грамматические и синтаксические (связанные со структурой предложения) правила языка и по-разному воспринимать один и тот же акустический стимул. В результате классификация речевых звуков, основанная на физических (или психоакустических) свойствах последних и характерная для маленьких детей, постепенно сменяется классификацией, основанной на лингвистической релевантности звуков. Следовательно, развитие речи есть результат приобретения языковых навыков и попыток придать лингвистический смысл акустической стимуляции.

Речевые зоны головного мозга. Физиологическое доказательство, свидетельствующее в пользу гипотезы об уникальности речи, основано на существовании определенных зон мозга, обрабатывающих речевую информацию. (Вспомните, что выше мы говорили и о зонах, «специализирующихся» на восприятии музыки.)

В начале этой главы, говоря о функциональных различиях правого и левого полушарий мозга и о том, что они по-разному обрабатывают лингвистическую и нелингвистическую информацию, мы отметили, что приоритет в обработке речевой стимуляции принадлежит левому полушарию. То, что в левом полушарии имеются четко ограниченные зоны, «специализирующиеся» на различных связанных с языком формах активности, было убедительно доказано с помощью таких методов визуализации мозга, как ПЭТ (Soderfeld et al., 1997) и ФМРТ (Binder et al., 1996; Calvert et al., 1997). В главе 2 мы рассказывали о том, что эти методы позволяют наблюдать за процессами, происходящими в мозге человека непосредственно в тот момент, когда он воспринимает лингвистический стимул и обрабатывает содержащуюся в нем информацию.

На рис. 14.9 представлены две основные кортикальные зоны, связанные с обработкой лингвистической стимуляции. Центр Брокá, расположенный в нижней части лобной доли, назван по имени французского хирурга и анатома Поля Брокá (1824–1880), который в 1861 г. обнаружил, что именно этот участок левого полушария играет основную роль в воспроизведении речи. Участок левого полушария, «ответственный» за понимание речи, называется центром Вернике (по имени немецкого психиатра и невролога Карла Вернике).

Повреждение любого из этих центров может вызвать нарушение речи, называемое *афазией*. В частности, травма центра Брокá приводит к значительной утрате способности говорить — к так называемой *афазии Брокá*, или *моторной афазии*, а травма центра Вернике оказывает существенное влияние на способность понимать услышанное (этот недуг называется *афазией Вернике*, или *сенсорной афазией*). Наибольший интерес для нас (с точки зрения специфики обсуждаемого вопроса) представляет то обстоятельство, что ни при одной из этих форм афазии у пациентов не наблюдается нарушение других аудиальных функций, таких, например, как локализация источника звука, и не снижается острота слуха.

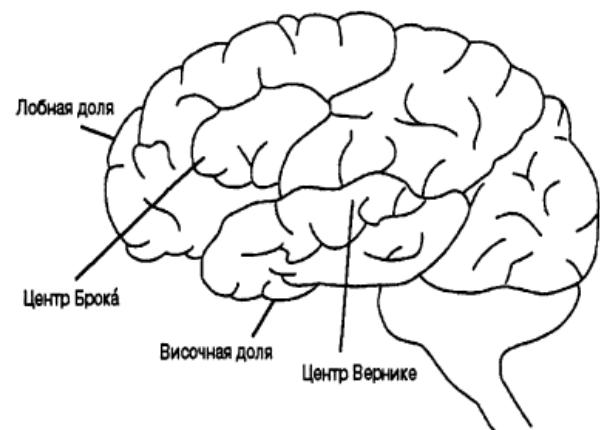


Рис. 14.9. Схематическое изображение левого полушария головного мозга человека

Центр Брокá и центр Вернике — основные центры, связанные с процессами говорения и обработки содержащейся в речи информации соответственно. Эти речевые центры связаны пучком нервных волокон (*arcuate fasciculus*) (на рисунке не показано)

Зная о том, насколько экономна нервная система, вполне можно предположить, что уж коль скоро в процессе эволюции в мозге образовались специальные центры — речедвигательный и воспринимающий речь, следовательно, в образующих речь элементах должна присутствовать некая специфическая, биологически relevantная форма стимуляции. По крайней мере то, что специфическим функциям речи соответствуют определенные центры левого полушария головного мозга, согласуется с представлениями о существовании системы, играющей роль «процессора» речи.

Аудиовизуальная интеграция: эффект Мак-Гурка. Уникальность речи заключается также и в том, что при типичной вербальной коммуникации слушатель воспринимает не только акустические звуковые сигналы, источником которых является говорящий, но и сопровождающую их мимику — движения его лица и губ. Иными словами, слушая собеседника, мы нередко видим его лицо, «формирующее» речевые звуки. Могут ли эти визуальные признаки влиять на восприятие речи? В какой мере восприятие речи зависит от того, видим мы лицо собеседника или нет?

Наиболее яркое доказательство того, что визуальные признаки влияют на восприятие речи, — **эффект Мак-Гурка**, который проявляется в том, что аудиальная и визуальная информация, которую несет в себе речь, взаимодействуют между собой и влияют на то, что мы слышим. Визуальная картина речи влияет на восприятие слушателя. Проводя свое оригинальное исследование, Мак-Гурк и Мак-Дональд создали такие условия, при которых аудиальные сигналы произносимого слога полностью не соответствовали (противоречили) сопутствовавшим им визуальным сигналам (McGurk & MacDonald, 1976; см. также Dodd, 1977). В одном из экспериментов они демонстрировали испытуемым видеозапись женщины, многократно произносившей одними губами слоги *ga-ga*, в то время как фонограмма воспроизводила слоги *ba-ba*. Когда испытуемые закрывали глаза и только слушали фонограмму, они точно распознавали слоги. Более того, когда они видели только движения губ говорившей женщины, а фонограмма была выключена, они достаточно точно идентифицировали произносимые ею звуки как *ga-ga* (подтверждая тем самым, что при необходимости мы можем читать по губам и что, возможно, делаем это гораздо чаще, чем нам кажется). Однако когда испытуемым одновременно предъявлялись противоречие друг другу аудиальный и визуальный стимулы, они слышали звуки, которых не было ни в одном из них. Например, когда испытуемые видели на экране женщину, артикуляция губ которой соответствовала слогам *ga-ga*, и одновременно звучал акустический сигнал *ba-ba*, большинство из них слышали совсем другой звук — *da-da!* Интересная деталь: большинство испытуемых не осознали несоответствия аудиальной и визуальной стимуляций.

Аудиовизуальной интеграции, по-видимому, присущ автоматизм, и эта ее особенность имеет общий характер. Известно, что стойкое влияние визуальной стимуляции на восприятие звука проявляется даже при очевидном несоответствии пола человека, за артикуляцией губ которого наблюдают, звучащему голосу (Green et al., 1991). Если испытуемые смотрели видеозапись мужчины, произносившего одними губами *ga-ga*, и слышали женский голос, говоривший *ba-ba*, они осознавали несоответствие сигналов, но это не мешало им воспринимать иллюзорную фонему *da*. Иными словами, влияние визуального стимула на восприятие сохранялось.

Визуальная картина голосовых *усилий* также может влиять на воспринимаемую громкость звуков. Розенблум и Фаулер (Rosenblum & Fowler, 1991) предъявили испытуемым аудиовизуальное изображение мужчины, произносившего разные слоги, но визуальный дисплей очевидных усилий, прикладываемых им при этом, не соответствовал интенсивности звуков, которые были слышны. Например, испытуемые видели человека, произносившего слог с видимым усилием (что соответствует громкому звуку), но слышали тихо произнесенный слог. Даже несмотря на то, что экспериментаторы просили испытуемых судить о громкости звука только по тому, что они слышат, один лишь вид человека, произносящего слог с нескрываемым усилием, существенно увеличивал громкость воспринимаемого звука, и чем больше были голосовые усилия человека на экране, тем более громким казался звук испытуемым.

Аудиовизуальная интеграция, проявлением которой является эффект Мак-Гурка, свидетельствует о том, что при определенных обстоятельствах восприятие речи зависит не только от акустических сигналов. Установлено (с помощью такого метода визуализации мозга, как ФМРТ), что чтение по губам активирует те же аудиальные центры мозга, которые активируются и при восприятии звучащей речи, и что механизмы активации аналогичны (Calvert et al., 1997). Является ли само по себе существование интеграции таких признаков, как движения губ и звуки речи, доказательством уникальности речи? Возможно, нет. Во-первых, и люди, и животные проявляют склонность к аудиовизуальной интеграции и в тех случаях, когда имеют место неречевые звуки (Heffner & Heffner, 1992; Saldana & Rosenblum, 1993). Сама по себе локализация звучащих объектов подвержена влиянию визуальной стимуляции. В известной мере то, что вы видите, помогает вам определить, откуда доносится звук. Более того, высокий уровень понимания речи может быть достигнут и без движения губ и прочих визуальных признаков. Способность незрячих людей воспринимать речь и собственный опыт читателей, связанный с прослушиванием радиопередач, подтверждают справедливость этого утверждения. Однако аудиовизуальная интеграция бесспорно свидетельствует о том, что визуальная компонента речи в тех случаях, когда она доступна, становится дополнительным источником информации, сочетающимся со словами. Это может быть очень полезно, и прежде всего в условиях повышенного шума, ибо уменьшается вероятность того, что говорящий будет превратно понят. Сказанное прежде всего относится к ситуациям, когда одновременно звучат несколько сообщений: восприятие того из них, которое имеет к нам непосредственное отношение, значительно облегчается, если есть возможность наблюдать за движениями губ говорящего. Более того, при определенных условиях только выражение лица и жесты оратора способны донести до слушателей эмоциональное и когнитивное содержание его речи, которые не были бы восприняты ими, если бы они слышали одни слова (Iverson & Goldin-Meadow, 1998).

Обобщая все изложенное выше, можно сказать, что источники восприятия речи различны: это и частотные характеристики речевых звуков, и сопровождающая последние визуальная информация, и индивидуальные особенности самого сл�шателя. На вопрос, который мы задали в самом начале главы: «Уникальна ли речь?», пока нет однозначного ответа. Хотя у нас нет достаточных оснований утверждать,

что речь является специфической формой аудиальной информации и потому требует специального механизма или модальности, подобная трактовка — соблазнительная гипотеза, и не исключено, что она соответствует действительности.

Прежде чем перейти к рассмотрению других вопросов, уместно высказать одно соображение общего характера. Из нашей краткой дискуссии читатель не мог не понять — мы это подчеркивали — всю тщетность попыток прийти к одному приемлемому и достаточно полному объяснению восприятия речи. Не исключено восприятие речи, что, как и другие сложные формы деятельности и способности человека, базируется не на одном, а на нескольких механизмах. В любом случае, не должно быть сомнений в том, что понимание восприятия речи далеко выходит за рамки простого анализа физических свойств речевых звуков и восприятия последних слухом.

Анализ аудиальной сцены

Многие функции слуха, описанные в данной главе, такие, например, как локализация звуков, а также восприятие музыки и речи, представлены нами таким образом, словно аудиальная система преимущественно имеет дело с единичными событиями, т. е. мы слышим звук и сразу же определяем местоположение его источника, слышим несколько нот и узнаем мелодию, слышим последовательность фонем и воспринимаем смысл сказанного. Но в реальной жизни на нас гораздо чаще одновременно воздействует огромное количество накладывающихся друг на друга звуков разного характера. Короче говоря, мы все время сталкиваемся с тем, что может быть названо *аудиальной сценой*. Нас постоянно окружают звуки музыки, человеческая речь и шум, на фоне которого они слышны, и все это вместе образует сложный звуковой поток. Однако вопреки этой акустической сложности мы обычно воспринимаем отдельные, изолированные аудиальные события. Иными словами, как правило, мы слышим не какофонию звуков, источниками которых являются не связанные между собой различные объекты, а способны разобраться в них и идентифицировать различные звучащие объекты как отдельные события — мы перцептивно *анализируем* сложную аудиальную сцену и раскладываем ее на компоненты.

Чтобы оценить подобную возможность, представьте себе знакомую ситуацию, когда сразу говорят несколько человек. Несмотря на то что до нас одновременно доносится много слов, мы без труда следим за тем, что говорит каждый. Каким образом наша аудиальная система, будучи подвергнута одновременной стимуляции различными видами звуковой энергии, вычленяет из этой сложной смеси определенный акустический сигнал и «сосредоточивается» на нем? Иными словами, как аудиальная система анализирует сложную стимуляцию и решает, какие элементы этой стимуляции имеют один и тот же источник? Альберт Брегман, в течение многих лет изучавший это явление, назвал способность к восприятию сложной акустической стимуляции с точки зрения отдельных источников звуков **анализом аудиальной сцены** (Bregman, 1981, 1990; Rogers & Bregman, 1993). По мнению Брегмана (Bregman, 1993) и других авторов (Beauvois, 1998; Beauvois & Meddis, 1995), анализ аудиальной сцены выполняется акустическим аналогом гештальтистских орга-

низационных факторов (или факторов группирования) визуального восприятия (которые были описаны в главе 7 и к которым мы вновь обратились в этой главе, в подразделе, посвященном восприятию музыки).

Аудиальные потоки

Какие акустические свойства аудиальных стимулов способствуют их перцептивному группированию? Согласно представлениям об анализе аудиальной сцены, нам свойственна тенденция слышать **аудиальные потоки** — группы звуков, которые мы приписываем одному источнику, поскольку они обладают однородными отличительными признаками или имеют общие перцептивные характеристики. Следовательно, группы звуков, которые в течение какого-то времени остаются идентичными друг другу, например по высоте, громкости или тембру, скорее всего, будут приписаны одному источнику, объединены и восприняты как различные и изолированные друг от друга акустические события (Bregman et al., 1999). Например, в ситуации, когда в помещении одновременно ведется несколько бесед, каждая из них может иметь свой собственный акустический рисунок (с точки зрения высоты и громкости звуков), вследствие чего мы и слышим их как отличные друг от друга. В известной мере, причиной подобного явления может быть то, что **каждый разговор происходит в определенной точке пространства и создает свой собственный паттерн высот и громкости**.

Распознавание индивидуальных различий речевых паттернов различных людей тоже может влиять на перцептивное объединение звуков в отдельные, не связанные между собой акустические события. Как правило, манера говорить и голоса достаточно индивидуальны (акцент, построение фразы, интонации), и не представляет особого труда отличить одного оратора от другого, а затем и воспринимать то, что он говорит, как единый самостоятельный аудиальный поток (Nygaard et al., 1994). Зачастую, в самих условиях аудиальной стимуляции присутствуют некие отличительные признаки, по которым возможно группирование, в результате чего **каждый разговор становится перцептивно самостоятельным событием**. Иными словами, аудиальная система разделяет перцептивно аналогичные акустические события на самостоятельные аудиальные (звуковые) потоки.

Разделение аудиальных потоков. Представьте, что произойдет, если две простые знакомые мелодии исполняют одновременно, причем они не только звучат примерно в одной и той же тональности, но и имеет место последовательное чередование нот (Dowling, 1973; Dowling & Harwood, 1986; см. также Hartmann & Johnson, 1991), за первой нотой одной мелодии следует первая нота другой мелодии, за которой следует вторая нота первой мелодии и т. д. Перцептивным результатом прослушивания этой «мешаницы» звуков будет большая или меньшая путаница, и ни одна из мелодий не будет узнана.

Однако если мы постепенно изменим частотные компоненты каждой из мелодий таким образом, что, скажем, все ноты одной из них будут слышны как более высокие, чем ноты другой (но тональный хроматизм, или тональная связь между нотами каждой мелодии не изменится), обе мелодии предстанут в качестве двух перцептивно различных потоков. Иными словами, благодаря тенденции перцептивно группировать ноты одинаковой высоты ряды чередующихся звуков объ-

единяются в высокий и низкий потоки — в перцептивно отличные друг от друга аудиальные события. Подобное разделение сложного акустического сигнала на отдельные аудиальные потоки называется **разделением аудиальных потоков** (Bregman, 1990; Bregman et al., 1999). Как правило, распознавание различий между высокими и низкими звуками облегчает объединение чередующихся тонов в два самостоятельных аудиальных потока.

Продолжительность звучания также может быть критерием разделения звуков на разные потоки, и чем больше одна серия звуков отличается по этому параметру от другой, тем легче происходит их разделение на отдельные потоки (Beauvois, 1998). Иными словами, звуки одной продолжительности кажутся «связанными друг с другом» и образуют единый аудиальный (звуковой) поток. Мы полагаем также, что такие факторы, как концентрация внимания, опыт и обучение, тоже помогают нам в интерпретации, анализе и разделении сложных аудиальных сцен. Чтобы правильно оценить работу сердца или легких больного с помощью стетоскопа, врач должен прекрасно знать паттерны звуков, требующих особого внимания, и уметь отличать жизненно важные сигналы от постороннего шума. И последнее. Анализу аудиальной сцены благоприятствуют условия, способствующие точной локализации источника звука. Чем больше признаков имеется в распоряжении слушателя для того, чтобы отличить один звучащий объект от другого, тем более результативен выполненный им анализ аудиальной сцены. Некоторые свидетельства анекдотического характера позволяют предположить, что монауральные слушатели хуже справляются с задачей восприятия аудиальных потоков и разделения акустических событий, чем бинауральные (N. Schiffman, 1994). Короче говоря, основным помощником в анализе аудиальной сцены является способность к локализации звуков.

Голосовая коммуникация у животных

Хотя такой вид коммуникативной деятельности, как речь, присущ исключительно человеку, звуки, издаваемые многими животными, начиная от насекомых и кончая приматами (в том числе и земноводными, и птицами), могут использоваться в качестве средства внутривидового обмена информацией.

Паттерны коммуникативного поведения различных биологических видов в высшей степени индивидуальны и отличаются друг от друга как по способам воспроизведения звуков, так и по содержащейся в них информации. Например, такие насекомые, как цикады, зеленые кузнечики и сверчки (особенно самцы), используют звуковые сигналы, чтобы сообщать о своих «матrimonиальных» намерениях и поддерживать связь друг с другом. Птицы прибегают к помощи звуковых сигналов — к крикам или к пению — для таких разных целей, как защита территории, гнездование, выражение родительских чувств или установление и поддержание «супружеских уз». Так, северный пересмешник использует свой исключительно широкий певческий репертуар и мимикрию для привлечения брачного партнера. Одиночные самцы поют значительно чаще, чем их «семейные» товарищи. К тому же они и более активны: перелетая с места на место, они исполняют свои песни там, где обитают разные колонии, расширяя тем самым зону поиска подруги и увеличивая свой шанс найти ее (Breitwisch & Whitesides, 1987; Lewin, 1987).

Млекопитающие тоже широко используют вокализацию для внутривидового общения. В том, что естественный отбор благоприятствовал формированию функциональной системы голосового оповещения об опасности, нет ничего удивительного. Известно, что тревожными криками предупреждают друг друга о появлении хищника земляные белки (MacWhirter, 1992) и некоторые другие грызуны, например желтобрюхие сурки (Blumstein & Armitage, 1997; Blumstein et al., 1997). Много-кратно подтвержден и тот факт, что своим воем волки оповещают о принадлежности к определенному виду, местоположении и, возможно, о своем эмоциональном состоянии (Theberge, 1971). Голосовая коммуникация свойственна и их близким родственникам, собакам.

Звуки, издаваемые собаками

Стэнли Корэн, психолог-экспериментатор, а также заводчик собак и кинолог-инструктор, проанализировав издаваемые собаками звуки, пришел к выводу о том, что многие из них имеют совершенно конкретный смысл и их цель — сообщить об определенном событии (Soren, 1994). Собака издает много разных звуков, и Корэн обратил внимание на то, что низкие звуки, как правило, свидетельствуют об угрозе, злости и возможной агрессии. В большинстве случаев устойчивые, низкие звуки сигнализируют о поведении, которое последует за ними: например, лай предшествует нападению. Пронзительные, отрывистые звуки, такие как, например, визг, означают боль или страх. Скорость, с которой звуки издаются, может кардинальным образом изменить их смысл, и высокочастотное повизгивание может свидетельствовать об удовольствии или игривом настроении. В скорости, с которой издаются звуки, может также содержаться и определенный смысл: быстро повторяющиеся звуки свидетельствуют о возбуждении и сообщают «о неотложном деле»; продолжительный, жалобный вой означает потребность во внимании хозяина.

Звуки, издаваемые приматами

Приматы также издают сигналы, несущие определенную информацию, и обмениваются ими. Возможно, лучше других приматов изучены макаки-резус (Rowell, 1962). Автор описал совершенно определенные звуки, издаваемые макаками-резус и выражавшие некоторые аспекты состояния животных в определенных условиях. Например, очень уверенное в себе животное, угрожая «нижестоящему» собрату, протяжно и весьма громко рычит. Признающий себя побежденным в схватке сообщает об этом пронзительным писком.

Доказано также и то, что некоторые виды обезьян, оповещая друг друга о появлении разных хищников — леопардов, орлов или питонов, издают акустически отличные друг от друга крики, сигнализирующие об опасности и называемые *ситуационно специфическими* криками (Seyforth et al., 1980). Изучение поведения обезьян в естественных условиях, в джунглях Кении, позволило автору сделать следующие выводы. О появлении леопардов они оповещают друг друга «короткими тональными криками, делая обычно несколько вдохов и выдохов», о появлении орлов — «низким, отрывистым ворчанием», а о появлении питонов — «визгливым щебетом». Более того, эти крики не только предупреждают об опасности, но и «со-

общают о том, что нужно делать», чтобы избежать ее. Когда магнитофонная запись этих тревожных криков была предъявлена обезьянам в отсутствие реального хищника, взрослые особи вели себя в полном соответствии с охотниччьими повадками хищника, о появлении которого сообщала запись. Так, если обезьяны были на земле, то запись «леопардовой» тревоги заставляла их взбираться на деревья (при этом они становились менее уязвимыми для леопарда, обычно набрасывающегося на свою жертву из засады). Заслушав звуки, оповещавшие о приближении орла, обезьяны поднимали головы вверх и бежали в укрытие, а при звуках, означавших появление питона, — осматривали землю вокруг себя. Подобная реакция свидетельствует о том, что каждый из этих тревожных криков соответствует определенному типу опасности (см. также Hauser, 1997, 1999).

Интересно взглянуть на эволюцию языка с точки зрения голосовой коммуникации животных. Считается, что в развитии языка основную роль сыграл необычный интеллект, свойственный исключительно людям, т. е. что язык — это уникальный продукт человеческого интеллекта, а потому он доступен только людям (Lepneberg, 1967). Более того, оспаривалась точка зрения, согласно которой голосовой аппарат человека возник в результате эволюции структуры, аналогичной голосовому аппарату шимпанзе (Lieberman & Crelin, 1971; Lieberman et al., 1972). Исходя из описанных выше фактов, вполне можно предположить, что появление человеческого разговорного языка — результат длительной эволюции, которая включала трансформацию анатомической структуры через мутацию, последовательные изменения и естественный отбор и кульминацией которой явилась знакомая всем нам, но от этого не менее удивительная система голосовой коммуникации — речь.

Выводы

Эта глава посвящена преимущественно функциональному и смысловому аспектам аудиальной стимуляции и слуха, причем основное внимание мы уделили локализации звучащих объектов, а также восприятию музыки и речи. Мы начали с описания нейрофизиологических основ аудиальной системы и контролирующей роли мозга и отметили, что нейронный импульс, возникающий в левом ухе, преимущественно воспринимается аудиальной зоной правого полушария головного мозга, аналогично этому аудиальная зона левого полушария играет основную роль в обработке нейронных сигналов, посыпаемых правым ухом. Мы также рассказали и о некоторых функциональных различиях полушарий, выявленных с помощью дихотического прослушивания.

Следующий раздел главы посвящен пространственному восприятию звуков — восприятию их удаленности и локализации — на базе монаурального, и особенно бинаурального, слуха. Как правило, основным монауральным признаком, с помощью которого слушатель определяет относительную удаленность источника звука, является интенсивность последнего. Свидетельством относительной удаленности движущегося источника звука может быть также и изменение высоты, происходящее благодаря эффекту Доплера. Однако точная локализация источника звука возможна только на основании бинауральных признаков. Мы описали такие бинауральные признаки, как интерауральные различия во времени (прибытия

звука. — Примеч. пер.) и в интенсивности, связав их с такими факторами, имеющими непосредственное отношение к локализации звука, как эффект предшествования, стереофоническое звуковосприятие, роль движений головы и ушной раковины, а также с эхолокацией у животных и человека.

Мы рассказали о том, что летучим мышам свойственна уникальная способность к локализации звуков, основанная на эхолокации и обусловленная тем, что в аудиальной зоне мозга летучей мыши имеются специальные нейроны, настроенные на восприятие временного интервала между импульсом и отраженным звуком. Рассматривая вопрос об эхолокационных возможностях человека, мы обратили основное внимание на способность активных незрячих людей избегать столкновений с препятствиями. Мы кратко остановились на таких аспектах этой проблемы, как роль раннего визуального опыта в развитии невизуальных пространственных способностей слепых и создание индивидуальной системы ориентации как навигационного средства для незрячих людей.

Рассказывая о восприятии музыки, мы старались привлечь внимание читателей к тому, что музыка — это опыт психологического переживания, зависящий от того, как слушатель воспринимает взаимосвязь музыкальных звуков (нот) в определенном контексте. Мы описали такие понятия и явления, непосредственно связанные с восприятием музыки, как основы записи музыки, абсолютный слух и соотношение октав. Исходя из представления об эквивалентности октав мы проанализировали высоту тона с помощью двухмерной шкалы, основанной на его высоте и тональном хроматизме.

Затем мы рассказали о такой форме музыкальной агнозии, как амузия. Амузия является следствием дисфункции определенной зоны височной доли, избирательно влияющей на способность распознавать мелодии или строй и никак не сказывающейся на других акустических способностях, например на способности локализовать источники звуков и воспринимать речь.

Мы пришли к выводу о том, что восприятие мелодий основано на распознавании определенных связей и неизменных глобальных отличительных признаках музыкального пассажа. Более конкретно эта мысль может быть выражена следующим образом: в основе восприятия музыки лежат свойственные слушателю тенденции, происходящие из таких гештальтистских организационных факторов, как факторы близости, сходства, общей судьбы, замкнутости, а также из восприятия сочетания «фигура—фон». Раздел, посвященный восприятию музыки, завершается кратким описанием цветовой синестезии и обусловленных музыкальными впечатлениями цветовыми ассоциациями, а также общими рассуждениями о роли музыки.

Предпоследний раздел главы посвящен роли аудиальной системы в восприятии речи. Мы идентифицировали и проанализировали некоторые физические характеристики звуков, являющихся базовыми элементами речи, с точки зрения их роли в ее воспроизведении и восприятии, а также рассмотрели роль фонемы и спектограммы в восприятии речи. Восприятие речи отличается чрезвычайной устойчивостью по отношению к внешним воздействиям: смысл сказанного в определенной мере может быть понятен даже тогда, когда речь слышна на фоне постороннего шума или существенно искажена, например при удалении целых групп частот или при отсутствии некоторых звуков, фонем и т. д.

Мы также рассмотрели некоторые вопросы, принципиально важные для восприятия речи. Например, каким образом слушатель выделяет из вербальной стимуляции отдельные компоненты и извлекает из непрерывного звукового потока отдельные слова? Отвечая на этот вопрос, мы подчеркнули, что восприятию отдельных слов способствуют их знание и лингвистический контекст.

Затем мы перешли к рассмотрению вопроса о том, является ли речь уникальной формой аудиальной стимуляции, обработка которой требует специальной сенсорной модальности и механизмов. Мы описали несколько теорий и концепций, базирующихся на этой точке зрения. Начали мы с моторной теории речи, согласно которой восприятие речи базируется на знании моторики, вовлеченной в процесс воспроизведения речи. Идея об уникальности речи подтверждается также и категориальной перцепцией, феноменом, суть которого состоит в том, что легче отличить друг от друга две фонемы с разным временем, необходимым для возникновения звукового сигнала, такие, например, как [b] и [p], чем две формы одной и той же фонемы с одинаковым временем, необходимым для возникновения звукового сигнала (например, две фонемы [bs] и [ps]). Иными словами, слушателю легче различить два похожих звука, если они лежат по разные стороны фонетической границы.

Мы также рассмотрели некоторые нейрофизиологические доказательства фундаментального отличия речи от других звуков. Идея детекторов отличительных лингвистических признаков исходит из существования нейронов, «настроенных» исключительно на обработку информации, содержащейся в звуках человеческой речи. Сторонники существования специфической сенсорной модальности, предназначеннной для восприятия речи, исходят из того, что этот процесс является результатом функционирования специальной нейронной структуры, в которой звуки, распознаваемые как речевые, подвергаются уникальным по своей сути обработке и анализу. Изложение подобной точки зрения привело нас к описанию двойственного восприятия, которое заключается в том, что звуковой сигнал способен одновременно воздействовать как на речевую, так и неречевую модальность. Предполагаемая уникальность речи подтверждается также и результатами нейрофизиологических исследований, в частности тем, что как в воспроизведении речи, так и в ее понимании участвуют специфические зоны мозга (центр Брокá и центр Вернике).

Завершая этот раздел, мы рассмотрели вопрос о том, как визуальная стимуляция, например возможность видеть лицо говорящего и движения его губ, способствует восприятию речи. Мы пришли к выводу, что визуальные и аудиальные признаки взаимодействуют друг с другом и влияют на то, что мы слышим. Этот феномен носит название эффекта Мак-Гурка. Основной вывод, к которому мы пришли, завершая рассмотрение восприятия речи, заключается в следующем: вопрос о том, является ли речь специфической формой аудиальной стимуляции, требующей для обработки заключенной в ней информации некоего специального «процессора», остается открытым.

Затем мы обсудили тенденцию извлекать из сложной акустической стимуляции и слышать самостоятельные и не зависящие друг от друга источники звуков — аудиальные потоки. По своей перцептивной сути эта тенденция аудиальной системы, названная анализом аудиальной сцены, аналогична гештальтистским фак-

торам группирования, проявляющимся в визуальном восприятии. Мы также рассмотрели отличительные признаки, способствующие извлечению из сложной аудиальной сцены отдельных звуков и их объединению в аудиальные потоки.

Завершая главу, мы кратко рассказали о нелингвистической голосовой коммуникации у животных и описали типичные звуки, издаваемые собаками и приматами, которые могут иметь определенный смысл и сообщать об определенных событиях.

Ключевые слова

Абсолютный, или идеальный, слух

Анализ аудиальной сцены

Аудиальные потоки

Бинауральные признаки

Бланкирование речи

Время, необходимое для возникновения звукового сигнала

Высота тона

Двойственное восприятие

Детекторы отличительных лингвистических признаков

Дихотическое прослушивание

Индивидуальная система ориентации

Интерауральное различие в интенсивности

Интерауральное различие во времени

Категориальная перцепция

Контекст

Контролирующая роль мозга

Метод селективной адаптации

Монауральные признаки

Моторная теория (восприятия речи)

Музыкальная агнозия (амузия)

Нейроны, настроенные на восприятие временного интервала между импульсом и отраженным звуком

Октаава

Разделение аудиальных потоков

Речевая сенсорная модальность («процессор» речи)

Синестезия

Слуховая кора головного мозга

Сонар

Спектограмма

«Срезание частот»

Стереофоническое звуковосприятие

Тональный хроматизм

Тонатопическая организация

Ушная раковина

Фонема

Фонетическая граница

Форманта

Цветовая синестезия

Центр Брокá

Центр Вернике

Эквивалентность октав

Эффект восстановления фонемы

Эффект Доплера

Эффект Мак-Гурка

Эффект предшествования

Эхолокация

Вопросы для проверки усвоения материала

1. Опишите проводящий путь слухового анализатора (от уха до мозга) и расскажите о нейрофизиологической основе локализации звука.
2. Докажите, что два полушария мозга функционируют по-разному. Какова роль дихотического слушания в обнаружении этих различий? В чем эти различия проявляются?
3. Перечислите монауральные и бинауральные признаки восприятия звуков. Каким образом интерауральные различия во времени и интенсивности спо-

собствуют локализации звука? Как движения головы помогают правильно локализовать источник звука, находящийся на срединной плоскости?

4. Исходя из базовых принципов, лежащих в основе локализации звуков, опишите процедуру, с помощью которой можно разоблачить симулянта, утверждающего, что он глух на одно ухо. Какое значение имеет эта процедура для локализации звука и стереофонического звуковосприятия?
5. Какую роль в локализации звуков играет ушная раковина?
6. Что такое эхолокация и как ее используют разные биологические виды? Что свидетельствует в пользу способности человека к эхолокации?
7. Какую роль в восприятии пространства незрячими людьми играют различные звуки и их эхо? Какие аспекты аудиальной стимуляции наиболее информативны для локализации источника звука? Каким образом ранний визуальный опыт может помочь слепым людям в невизуальном восприятии пространства?
8. Чем звуки музыки отличаются от других звуков? Какие тональные свойства и акустические параметры определяют восприятие последовательности звуков в качестве музыки?
9. Расскажите о том, как обозначаются музыкальные звуки. Какую роль в восприятии музыки играет соотношение октав? Почему высота музыкальных звуков оценивается как с точки зрения их высоты, так и с точки зрения тонального хроматизма?
10. Чем уникальна мелодия? Почему мелодии остаются практически неизменными, даже будучи транспонированными в другую тональность? Какие глобальные отличительные признаки мелодии и гештальтистские факторы группирования участвуют в восприятии мелодий? Как с точки зрения этих факторов можно охарактеризовать амузию?
11. Что такое цветовая синестезия? Как можно ее продемонстрировать?
12. Расскажите о том, как устроен голосовой аппарат человека, и о том, как он функционирует в процессе воспроизведения речи. Каковы физические диапазоны речевых звуков? Что называется фундаментальными речевыми единицами? Какую роль в восприятии речи играют фонемы, а также гласные и согласные звуки?
13. Что такое спектограмма? Какие выводы относительно связи между потоком акустической энергии и восприятием речи могут быть сделаны на основании спектограммы? Какие трудности возникают при попытке описать речь только на основании ее физических параметров? Почему?
14. Расскажите о восприятии речи, в которой присутствуют акустические искажения. Как происходит восприятие речи, из которой удалены некоторые частоты (явление «срезание частот»)? Как воспринимается речь, в которой отсутствуют некоторые звуки? Что такое бланкирование речи?
15. Расскажите о лингвистическом контексте, в котором звуки воспринимаются как речь. Что такое эффект фонемического восстановления? Почему знакомство со звуками данного языка способствует восприятию слов?

16. Расскажите о гипотезе, суть которой заключается в том, что речь — это специфическая форма сложной аудиальной стимуляции, отличная от всех прочих форм подобной стимуляции. Приведите примеры, подтверждающие и опровергающие эту гипотезу.
17. Как моторная теория восприятия речи соотносится с предположением о том, что речь является специфической формой стимуляции? Рассмотрите категориальную перцепцию с точки зрения уникальности речевой стимуляции.
18. Что такое детекторы отличительных лингвистических признаков? Каким образом селективная адаптация подтверждает справедливость предположения о существовании детекторов отличительных лингвистических признаков? С какими проблемами сталкиваются сторонники существования этих детекторов при объяснении восприятия речи?
19. Помня о таком явлении, как двойственное восприятие, опишите речевую перцептивную модальность. В чем она может проявляться?
20. Какие зоны мозга принимают непосредственное участие в обработке информации, которую несет в себе речь?
21. Что такое эффект Мак-Гурка? О каком вкладе визуальной информации в восприятие речи он свидетельствует?
22. Что такое анализ аудиальной сцены? Что такое аудиальные потоки? Чему способствует разделение потоков?
23. Расскажите о гипотезе, суть которой заключается в том, что аудиальная коммуникация свойственна не только людям. Какое поведение и какие внешние события более других свидетельствуют о наличии у животных определенных форм коммуникаций?

ГЛАВА 15

Равновесие и ориентация в пространстве

Все перемещающиеся в пространстве живые существа должны сохранять определенную ориентацию по отношению к окружающим их объектам, следствием чего стало появление в ходе эволюции специальных механизмов — вестибулярных органов, органов чувств, воспринимающих изменения положения головы и тела в пространстве, а также направление движения. В этой главе будут описаны механизмы и некоторые явления, определяющие общие закономерности пространственной ориентации тела.

С точки зрения нашего сознательного восприятия, ощущения, вызываемые функционированием ориентационной системы, уникальны. В отличие от ощущений, вызываемых визуальными, аудиальными, тактильными и вкусовыми стимулами, а также запахами, ощущения, связанные с деятельностью ориентационной системы и управляющие движениями тела, не воспринимаются и, как правило, не замечаются нами. Это утверждение не вполне справедливо, ибо в определенных ситуациях мы все-таки осознаем собственные движения. Познакомившись с содержанием этой главы, читатель узнает о существовании необычных условий движения и ориентации, к «побочным продуктам» которых относятся такие весьма сильные неприятные ощущения, как головокружение и тошнота, которые, конечно же, не остаются незамеченными нами. Однако даже в подобных ситуациях ответная реакция на эту аномальную стимуляцию наступает автоматически, без контроля со стороны нашего сознания.

Несмотря на то что мы редко осознаем ориентационную информацию, ориентация очень важна. Ей принадлежит решающая роль при выполнении большинства движений, связанных с изменением положения тела, в частности при поддержании равновесия и положения тела (позы), рефлекторном сохранении направления взгляда при движениях головы и при координации движений тела относительно окружающего пространства.