### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЗВУКОВОГО АНАЛИЗАТОРА

Звуковой анализатор является филогенетически наиболее молодым из органов чувств и представляет собой наиболее позднее и совершенное приобретение человека.

Реагируя на малые изменения среды, происходящие на больших расстояниях, он является важнейшим дистантным рецептором. Биологическое значение его не может быть переоценено, так как звук является наиболее постоянным спутником любой деятельности, любой активности, любого движения во внешней среде, что объясняет большое распространение звуков в природе. Они постоянно доходят до нас, от них не заслоняет нас ни ночная тьма, ни окружающие предметы, для уха не существует приспособления, аналогичного веку глаза.

Поэтому сигнальное значение этого анализатора особенно велико. Вследствие наличия звукового анализатора мы не только дробим звук на отдельные элементы, но благодаря образованию условных связей узнаем значение окружающих нас звуков — шагов, лая собаки, шума трамвая и т. д.

Наконец, членораздельная речь осуществляется деятельностью второй сигнальной системы.

При помощи звукового анализатора человек различает звуки по их высоте, громкости и окраске (тембру). Высота того или другого звука (тона) определяется частотой колебаний. Человеческое ухо воспринимает звуки с частотой колебаний примерно от 16 до 20 000 Гц. Нижний и верхний пределы не представляют собой резко очерченную границу, а скорее некоторую область. Так, например, нижняя область охватывает звуки от 12 до 24 Гц, а верхняя от 18 000 до 22 000 Гц. Чем больше их амплитуда, тем более широко раздвигаются пределы слышимости. Это явление объясняется, по-видимому, тем, что локализация звуковых частот на основной мембране ограничена зоной от 100 до 10 000-13 000 Гц. Для более низких и высоких частот специальных участков (волокон) не существует. Восприятие этих звуков осуществляется благодаря обертонам, которые возникают при большой силе звуков. Поэтому при нарастании интенсивности звука верхняя граница восприятия повышается. Определение высоты тона в этой области отсутствует. При восприятии наиболее низких тонов примешивается ощущение вибрации, что затрудняет точное установление нижней границы.

Звуковые колебания с частотой ниже 16 колебаний относят к инфразвукам, выше 20 000 Гц — к ультразвукам. Диапазон звуков, воспринимаемых животными, не совпадает с объемом слышимых человеком звуков. Методом условных рефлексов доказано, что собаки воспринимают звуки до 30 000 Гц, кошки — до 40 000 Гц. Летучие мыши издают звуки высотой в 50 000-60 000 Гц и воспринимают их. Этим объясняется их способность избегать столкновения с предметами даже при выключенном зрении (принцип радара). В пределах своего диапазона нормальное человеческое ухо воспринимает все тоны беспрерывно, без пропусков.

Для высоты тона, помимо частотного числа, можно применять и нотные обозначения. Октавой называется тон, обладающий двойной частотой по отношению к первому. В октаве различают 7 ступеней, которые называются в музыке *до (c), ре (d), ми (e), фа (f), соль (g), ля (a), си (h)*.

Для восприятия слышимости частот, однако, требуется еще другое непременное условие — это достаточная амплитуда колебаний (сила или интенсивность звука). Поэтому не существует изолированного качественного исследования слуха (различения высоты) и количественного исследования (распознавания силы). Оба качества звука — его сила и частота — взаимосвязаны, и мы можем говорить о силе звука только конкретно по отношению к той или другой частоте. При этом обнаруживаются три изумительных свойства уха: 1) чрезвычайная чувствительность, т. е. восприятие даже слабейших звуковых сигналов; 2) большая выносливость по отношению к интенсивным звукам; 3) большое различие чувствительности к разным частотам.

Легко получить изображение функциональной способности уха, если по оси абсцисс отложить частоты звуков, а по оси ординат — их силу (в единицах давления — барах — или энергии — эргах, рис. 19).

Так как имеются очень большие колебания в частоте и особенно в силе звуков, то при изображении нарастания частот на графике применяется не арифметическая, а геометрическая прогрессия; интенсивность звука изображается в логарифмических единицах. При этом нижняя кривая соответствует порогам слышимости, т. е. отражает чувствительность уха к различным частотам. Как известно, порогом (абсолютным) слышимости называется наименьшая сила звука, которую воспринимает ухо при данной частоте.

Чувствительность соответствует величине, обратной пороговой интенсивности:

*E*0 = 1/*J*0,

где *E*0 — чувствительность уха; *J*0 — интенсивность на пороге слышимости.

Наибольшей чувствительностью ухо обладает к звукам в зоне 1000-4000 Гц, где порог соответствует звуковому давлению *P*0 = 0,000204 бара, т. е. 10-9 эрг/см2 сек или 10-16 Вт/см2 сек.

При удалении в обе стороны от этой оптимальной зоны чувствительность уха быстро падает, и в зоне 200 Гц и 10 000 Гц пороговая сила звука уже в 1000 раз больше, чем для звуков в 1000-4000 Гц.

Если исследовать звуки надпороговой силы, то оказывается, что при большом усилении звуки приобретают неприятный оттенок, а дальше примешиваются уже ощущения давления и боли в глубине уха. Для звука любой частоты можно определить эту зону давления и боли и, таким образом, получить кривую, ограничивающую зону слуха сверху — кривую давления и боли. Все, что находится между кривой чувствительности и кривой давления, составляет звуковое поле.

Объем этого звукового поля особенно значителен в оптимальной зоне слуха (1000-4000 Гц). Различие между обоими порогами в этой зоне (10-9 эрг — порог чувствительности и 10-4 эрг — порог давления) составляет величину, равную 10-13 . Техника не знает примера, где один и тот же прибор мог бы отвечать на воздействия, разнящиеся друг от друга на такие астрономические величины.

Представляется в высшей степени удобным выражать отношения между двумя интенсивностями звука в логарифмических единицах:

lg 10*J*/*J*0.

Эта единица называется бел (в честь изобретателя телефона Белла).

При этом весь диапазон интенсивности охватывается 13 логарифмическими единицами или 13 бел. Нулевой уровень звуковой энергии *J*0 может быть выбран произвольно, например 1 бар, тогда другие уровни будут отсчитываться от него вверх и вниз. Обычно за нулевой принимают уровень, равный 10-9 эрг/см2 сек, что соответствует силе звука несколько ниже порога для наиболее чувствительной зоны. В таком случае все слышимые звуки будут исчисляться в положительных единицах.

На практике более удобно пользоваться меньшей единицей — децибелом, которая равняется 0,1 бел.

При этом число децибелов (*N*) определяется формулой:

*N* = 10 lg 10*J*/*J*0.

Эта единица оказалась удобной еще и в том отношении, что она соответствует примерно той прибавке в силе звука, при которой уже возможно отличить по громкости один звук от другого.

Таким образом, децибел — это 0,1 десятичного логарифма отношения силы данного звука (*J*) к нулевому уровню (*J*0).

Если исходить из величины звукового давления, то число децибелов (*N*) будет соответствовать:

*N* = 10 lg 10*P*2/*P*02 = 20 lg 10*P*/*P*0.

Для наглядности приводим таблицу децибелов и соответствующих отношений звуковых интенсивностей (выраженных в эргах и барах).

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Дб* | 1 | 3 | 6 | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 150 |
|   | 1,26 | 2 | 4 | 10 | 102 | 104 | 106 | 108 | 1010 | 1014 |
| *P*/*P*0 | 1,12 | 1,41 | 2 | 3,16 | 10 | 102 | 103 | 104 | 105 | 107 |

### РАЗНОСТНЫЕ, ИЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ, ПОРОГИ СЛУХОВОЙ ЧУВТВИТЕЛЬНОТИ

Чувствительность звукового анализатора характеризуется не только величиной абсолютного порога (т. е. различение тишины от едва заметного звукового ощущения), но и способностью определять надпороговые звуки по их частоте и силе. Для этого следует определить тот минимальный прирост по частоте или силе звука, который различается ухом. Поэтому разностным, или дифференциальным, порогом частоты звука называется отношение еле заметного прироста в частоте к первоначальной частоте звука. Эти пороги — наименьшие в зоне частот 500—5000 гц и равны 0,003. Это значит, что изменение частоты звука всего на 3 гц при тоне в 1000 гц уже различается ухом как другая высота. При 4000 гц требуется прирост в 12 гц, и т. д.

Разностные пороги в зоне низких частот выше и достигают для 50 гц 0,01.

Разностным порогом силы звука называется тот минимальный прирост силы звука, при котором ощущается еле заметное усиление громкости первоначального звука.

Разностные пороги силы звука в среднем составляют 0,1—0,12, т. е. для того, чтобы один звук казался громче другого, следует усилить звук на 1/10 его первоначальной величины. Однако это оказывается правильным только для звуков средней силы, например в 40—60 дб над уровнем ощущения. Согласно закону Вебера-Фехнера, эта величина должна была быть постоянной для звуков слабых и громких. Однако оказалось, что для слабых звуков (близких к порогам) еле ощущаемый прирост достигает 1/4 и более. Упомянутые величины соответствуют примерно 0,4—2 дб, и т. д.; 1 дб — это средняя величина прироста силы, которую мы воспринимаем. Следует отметить, что разностный порог силы зависит и от частоты исследуемых звуков; порог особенно велик в зоне басовых звуков и наименьший — в зоне 500—4000 гц.

### ГРОМКОСТЬ

Соотношения между громкостью (особым ощущением звука) и силой звука (физическая величина) очень сложны, и поэтому следует четко различать эти понятия. Два равных по силе, но разных по частоте звука не являются равными по громкости: так, например, звук 64 гц при 40 дб (исчисленными по нормальному нулевому уровню) еще не слышен. Для сравнения громкостей звуков разной высоты принято определять еще уровень громкости, для чего сравнивают громкость исследуемого звука с равногромким звуком в 1000 гц и берут обозначение соответствующей силы в децибелах.

Для различения уровня силы от уровня громкости последний предлагается выражать в фонах, в отличие от децибелов, которыми обозначают уровень силы. Таким образом, численно фон соответствует уровню интенсивности (в децибелах) равногромкого звука в 1000 гц.

Нельзя, однако, думать, что уровень громкости в достаточной мере характеризует истинную громкость, т. е. количественную оценку этого качества ощущения. Уровень громкости дает только возможность сравнения двух звуков по их громкости. Существует еще и непосредственная оценка человеком громкости звука. Так, например, в музыке давно применяется обозначение пианиссимо, пиано, меццопиано, меццофорте, форте и фортиссимо. Каждая ступень оценивается примерно в 2 раза громче, чем предыдущая. Весь диапазон музыкальных звуков охватывается интенсивностями в 70—80 дб. Поэтому можно приблизительно считать, что увеличение уровня силы на 10 дб удваивает громкость. Из данного примера видно, что увеличение уровня громкости не идет параллельно с нарастанием истинного ощущения громкости. Оказалось, что большинство людей может довольно точно определить двойную громкость звука.

**Анализ звуков.** Важнейшей способностью уха является способность к анализу сложных звуков. Все природные звуки, кроме основного тона, содержат ряд обертонов, или гармоник, придающих им определенную окраску — тембр. Звуки арфы, скрипки, рояля одинаковой силы и высоты отличаются величиной, числом и качеством обертонов и легко распознаются ухом. Анализ сложного звука на составные компоненты может быть проведен до известной степени натренированным ухом, а также при помощи резонаторов и сложных записывающих приборов.

Непериодические звуковые колебания, быстро меняющиеся во времени и непостоянные в силе и частоте, называются шумами. В смысле способности уха разлагать сложный звук на отдельные компоненты звуковой анализатор превосходит световой. Как известно, глаз не способен разлагать сложный белый цвет на составляющие его цвета радуги, т. е. не способен различать отдельные длины световых волн в их смеси.

###  АДАПТАЦИЯ

При воздействии на слуховой анализатор звуков происходят изменения его функциональных свойств. Повышение или понижение чувствительности, имеющее характер физиологического приспособления, носит название адаптации. Под влиянием сильных звуков чувствительность уха падает, а в тишине происходит адаптация к ней и чувствительность обостряется. Понижение чувствительности начинается сразу же по включении звука, достигает известного максимума и наблюдается в течение всего времени, пока действует звук, а после прекращения его держится еще в течение некоторого времени (последействие); затем чувствительность восстанавливается. Кроме чувствительности, меняется и ощущение высоты тона. Величина падения чувствительности, а также время восстановления ее зависят от интенсивности, высоты и времени действия раздражающего тона. Интересно отметить, что воздействие звуков небольшой силы вызывает падение чувствительности в основном для частоты тона раздражения. При сильных же звуках (70—110 дб выше порога) наступает падение чувствительности на широком диапазоне частот, причем наиболее выражено оно в зоне более высоких звуков, так что максимум падения чувствительности сдвинут в сторону соседних, более высоких звуков. Все это указывает на то, что явления адаптации происходят не только на периферии, но и в центральных звеньях анализатора. Особенно сильный адаптационный эффект дают высокие звуки (от 2000 до 4000 гц). При некоторых условиях (после дачи< слабых басовых звуков) иногда можно наблюдать енсибилизацию чувствительности.

От адаптации следует отличать утомление. Утомление наступает при перераздражении звукового анализатора, оно является процессом более длительным и, в отличие от адаптации, которая способствует работоспособности, всегда снижает работоспособность анализатора. После отдыха явления утомления постепенно сглаживаются и затем бесследно проходят. При частых и длительных перераздражениях наступает уже стойкое понижение функции, выявляется картина шумовой или звуковой травмы (акутравма), в основе которой лежат уже органические изменения в рецепторном аппарате (дегенерация волосковых клеток, нервных волокон и ганглиозных клеток спирального узла). Процессы адаптации при заболеваниях уха протекают по-разному, и изучение их представляет ценность для дифференциальной диагностики.

### МАСКИРОВКА

Хорошо известно, что при постороннем шуме звуки воспринимаются хуже. Так, в шумных цехах, в трамвае речь воспринимается хуже, многие более слабые звуки вовсе не слышны. Такое заглушение одного звука другим называется маскировкой. Звук, который заглушает другой, называется маскирующим, а исследуемый на этом фоне другой звук — маскируемым. Оказывается, как и следовало ожидать, что чем сильнее интенсивность маскирующего звука, тем сильнее его действие. Значительно маскируются все вышележащие частоты. Наиболее сильный эффект отмечается на звуки, близкие по частоте к маскирующему тону. Поэтому низкие звуки дают маскировочный эффект в большой зоне, при этом резко падает чувствительность ко всем вышележащим тонам. Явления маскировки имеют большой теоретический и практический интерес. При аудиометрии нередко приходится при помощи маскирующего звука заглушить противоположное, неисследуемое ухо. Однако маскирующий звук может вызывать нежелательный маскировочный эффект и на исследуемое ухо, — во-первых, тем, что изменяет функциональное состояние центров (центральная маскировка); во-вторых, он может передаться через ткани черепа на исследуемое ухо. Маскирующий звук в этом случае теряет в своей силе 40-50 дб, так как при прохождении звука через голову от одного до другого уха он ослабевает на эту величину.

**Музыкальный и абсолютный слух.** Следует отметить особую способность органа слуха отличать определенные отношения частот. Так, например, интервал частот 1:2 называется октавой, и она воспринимается одинаково по всему диапазону частот. Также специфически звучат для уха интервалы 3:2 — квинта, 4:3 — кварта, и т. д. Тонкое распознавание интервалов и звуковая память лежат в основе музыкального слуха.

Абсолютным слухом называется способность узнавать высоту любого звука (музыкального тона), а также в созвучии звуков — входящие частоты (например, в нотном обозначении). Как видно из этого определения, абсолютный слух можно исследовать главным образом у лиц, хорошо знакомых с музыкой. Одним из основных условий для абсолютного слуха является хорошая музыкальная память. Известно, что способность узнавать высоту звуков поддается тренировке. Так, например, музыканты относительно хорошо запоминают тон настройки своего инструмента и с ним сравнивают задаваемый тон. Поэтому у дирижеров упомянутая способность встречается относительно чаще. Высота тембровых и особенно хорошо знакомых исследуемому звуков распознается легче, чем высота звуков, лишенных окраски. Упомянутые выше свойства звукового анализатора обнаруживаются даже при наличии одного уха. Однако выполнение некоторых особых функций требует наличия парного органа слуха (бинауральный слух).

### ОТОТОПИКА

В связи с бинауральным слухом стоит способность узнавать направление звука — так называемая ототопика. Это свойство в биологическом отношении имеет огромное значение, особенно в мире животных. Определение места, откуда исходит сигнал опасности, имеет первостепенное значение.

При определении места, откуда идет звук, играют существенную роль в основном два фактора: различие в громкости, с которой слышен звук тем и другим ухом, а также различие во времени восприятия. Если, например, источник звука помещается справа, то правое ухо подвергается воздействию звука раньше левого, и интенсивность подходящего звука будет больше. Последнее зависит от того, что правое ухо ближе к источнику звука и, кроме того, левое ухо находится в тени головы. Экранирующее действие головы очень резко выступает для высоких звуков, поэтому различие в силе их играет существенную роль при определении источника высоких звуков. Для распознавания направления низких звуков особенно важным является временной фактор. Максимальная разница во времени будет наблюдаться, естественно, при помещении источника звука на линии, соединяющей оба уха. Расстояние между ушами в среднем составляет 21 см, звук проходит его в течение 0,63 мс. Так как некоторые лица различают отклонение источника звука от срединной линии всего на 3-4°, то следует считать, что они определяют разницу во времени в 0,03 мс. Естественно, чем шире расставлены уши, тем больше различие во времени прихода волны, тем точнее ототопика. Важным условием точной ототопики является наличие связи между обеими звуковыми зонами коры. С помощью методики условных рефлексов К. М. Быков показал, что способность узнавать направление, откуда идет звук, резко нарушается после перерезки мозолистого тела. Наиболее точно определяется направление при прерывистых, тембровых звуках, распространяющихся в горизонтальной плоскости. Хуже различается направление звуков в сагиттальной плоскости, например сзади или спереди. В данном случае придают известное значение ушным раковинам. Роль ушных раковин хорошо заметна у животных с подвижными раковинами (например, у лошади). Человек компенсирует эту способность при помощи легких поворотов головы.

### ФУНКЦИЯ НАРУЖНОГО И СРЕДНЕГО УХА

Звукопроводящий аппарат является весьма совершенной механической системой. Она отвечает и на минимальные колебания воздуха, которые вызывают сдвиги барабанной перепонки величиной меньше диаметра молекулы и способна передавать также колебания, в миллиарды раз (в 1013 и более превышающие их пороговую силу. Наконец, эта система разлагает сложный звук на его компоненты (синусоидные колебания), т. е. производит первичный анализ его.

Основным путем доставки звуков к уху является воздушный. Подошедший звук колеблет барабанную перепонку, и далее через цепь слуховых косточек колебания передаются на овальное окно. Одновременно возникают и колебания воздуха барабанной полости, которые передаются на мембрану круглого окна. Но так как давление на овальное окно превышает давление на круглое окно, то подножная пластинка в фазе сгущения вдавливается внутрь преддверия лабиринта, а мембрана круглого окна выпячивается в сторону барабанной полости.

Другим путем доставки звуков к улитке является тканевая или костная проводимость. При этом звук непосредственно действует на поверхность черепа, вызывая его колебания.

Костный путь передачи звуков приобретает большое значение, если вибрирующий предмет (например, ножка камертона) соприкасается с черепом, а также при заболеваниях системы среднего уха, когда нарушается передача звуков через цепь слуховых косточек.

Ушная раковина является до известной степени коллектором звуковых волн и имеет значение для ототопики (в частности, при определении направления звуков, идущих спереди или сзади).

Слуховой проход имеет форму трубки, благодаря чему он является хорошим проводником звуков в глубину. Некоторую роль при этом играет и хрящевая проводимость как ушной раковины, так и самого слухового прохода.

Ширина и форма слухового прохода не оказывают существенного влияния на звукопроведение. Об этом свидетельствует тот факт, что при наличии серной пробки в слуховом проходе слух заметно снижается только при полной закупорке его просвета. Извилистость наружного слухового прохода и высокая чувствительность его кожи способствует защите его от механических и термических факторов.

Благодаря конусовидной форме, неодинаковому натяжению отдельных частей и отягощению системой косточек барабанная перепонка не обладает, собственным резонансом и без искажений передает звуковые колебания на овальное окно.

Роль барабанной перепонки и слуховых косточек состоит в том, что благодаря им воздушные колебания большой амплитуды и относительно малой силы трансформируются в колебания ушной лимфы с относительно малой амплитудой, но большим давлением.

Это достигается, во-первых, тем, что площадь подножной пластинки стремени (3 мм2) примерно в 20-25 раз меньше площади барабанной перепонки, и поэтому энергия, принимаемая пластинкой стремени, концентрируется на меньшей поверхности; во-вторых, благодаря рычажному механизму функционирования слуховых косточек сила, передаваемая на ушную лимфу, увеличивается еще примерно в 2 раза. Таким образом, коэффициент трансформации будет равняться 50-60. По новейшим данным этот коэффициент равен 20-25, что объясняется тем, что только часть барабанной перепонки активно участвует при колебаниях.

При отсутствии этого трансформирующего приспособления звуковая волна, подойдя к лабиринтной стенке, почти полностью отражалась бы обратно и величина давления на лимфу была бы очень небольшой.

Давление стремени передается на несжимаемую ушную лимфу. Передвижение столба жидкости в улитке происходит благодаря податливости мембраны круглого окна, которая при давлении на овальное окно выпячивается в полость среднего уха, а при обратном движении стремени выгибается в полость улитки.

Водопровод улитки, периневральные и периваскулярные пространства нервов и сосудов внутреннего уха очень узки и в значительной степени заполнены элементами соединительной ткани; поэтому они, по-видимому, не имеют большого значения для сдвига лимфы под влиянием звуков.

Таким образом, чем большей податливостью обладает мембрана круглого окна, тем более выгодным это оказывается для раздражения рецептора.

Долгое время шли споры о функции круглого окна. Некоторые авторы считали, что затруднение подвижности круглого окна (например, при помощи трансплантата) или отягощение его (ватным шариком) усиливают слух. Однако более точные опыты показали, что ухудшение подвижности мембраны круглого окна всегда понижает остроту слуха, но экранирование его приводит к обострению слуха. В опытах на кошках Т. Н. Мильштейн удалось уложить трансплантат на нишу круглого окна таким образом, что между его мембраной и трансплантатом оказалась воздушная подушка. При этом улучшался слух, так как трансплантат экранировал круглое окно от воздушных волн, а податливость его мембраны не уменьшалась.

Благодаря связкам цепь слуховых косточек подвижно подвешена к стенкам барабанной полости и может совершать движения в разных направлениях. Точные измерения показали, что колебания цепи косточек совершаются преимущественно кнутри и кнаружи. При движении внутрь рукоятки молоточка такое же движение производит и длинный отросток наковальни. Подножная пластинка, однако, не совершает поршнеобразных движений кнутри и кнаружи, а скорее качается наподобие колокола около оси, образуемой утолщенной частью lig. annulare, которая занимает нижне-задний полюс овального окна.

При не слишком интенсивных звуках движение цепи косточек совершается как одно целое (без смещения в суставах между наковальней и молоточком).

В результате действия очень сильных звуков (порог боли и давления) движение в суставе между молоточком и наковальней тормозится, а подножная пластинка начинает производить вращательное движение вокруг длинной оси овального окна. Благодаря этому величина смещения лимфы уменьшается, т. е. в этих случаях действует защитный механизм. Таким образом, действие системы косточек в нормальных условиях усиливает доставку звуков к овальному окну (механизм концентрации и рычагов), при чрезмерных же звуках они (косточки) осуществляют защитную функцию: во-первых, в силу рассмотренных выше механических свойств, во-вторых, благодаря функции слуховых мышц, прикрепляющихся к слуховым косточкам.

При сокращении слуховых мышц цепь слуховых косточек делается менее подвижной, что нарушает нормальную звукопередачу и уменьшает передвижение ушной лимфы. При сильных звуках (примерно 60 дб выше порога) мышцы приходят в тетаническое сокращение. Латентный период рефлекса очень короткий, примерно 15-50 мс, причем максимальное сокращение наступает уже через 1/10 сек. Поэтому быстрота их действия может быть сравниваема с быстротой мигательного рефлекса. Таким образом, основная функция слуховых мышц состоит в защите уха от чрезмерно интенсивных звуков. Порог раздражения для басовых звуков у стременной мышцы понижен в сравнении с порогом m. tensor tympani.

При сокращении слуховых мышц чувствительность уха для басовых звуков падает на 30-40 дб; на восприятие дискантовых звуков сокращение мышц столь заметным образом не влияет; следовательно, благодаря этому рефлексу осуществляется защита уха от интенсивных басовых звуков. Так, например, при выпадении функции стременной мышцы (при параличах n. facialis) наблюдается болезненное восприятие сильных звуков (oxyocoia).

По мнению ряда авторов, при прислушивании происходит некоторое увеличение тонуса этих мышц, что приводит цепь косточек в наивыгоднейшее положение для передачи ничтожно малых колебаний. Косвенно это подтверждается наблюдениями В. Е. Перекалина, который при параличе лицевого нерва и бездействии стременной мышцы находил некоторое ухудшение восприятия речи.

Поэтому можно допустить, что слуховые мышцы, кроме основной защитной функции, выполняют и аккомодационную функцию, обеспечивая наиболее выгодное натяжение отдельных элементов звукопроводящей системы среднего уха.

Важным условием для правильной работы звукопроводящей системы является отсутствие различия в давлении по обе стороны барабанной перепонки. При понижении или повышении давления как в барабанной полости, так и в слуховом проходе натяжение барабанной перепонки меняется, акустическое сопротивление повышается и слух падает. В норме обычное атмосферное давление в барабанной полости обеспечивается вентиляционной функцией евстахиевой трубы. При глотании и зевании труба открывается и делается проходимой для воздуха. Повышение атмосферного давления в носоглотке (при помощи продувания уха, опыта Вальсальвы) способствует восстановлению давления в среднем ухе.

Кроме воздушного пути, проведения звуковых волн существует тканевый, или костный, путь.

Под влиянием воздушных звуковых колебаний, а также при соприкосновении вибраторов (например, костного телефона или костного камертона) с покровами головы кости черепа приходят в колебание (начинает колебаться и костный лабиринт).

На основании последних данных (Бекеши — Bekesy и др.) можно допустить, что звуки, распространяющиеся по костям черепа, только в том случае возбуждают кортиев орган, если они, аналогично воздушным волнам, вызывают выгибание определенного участка основной мембраны. Существенное значение имеют два типа костной проводимости.

1. Инерционный тип костной проводимости. Полагают, что под влиянием звуковых волн весь череп совершает колебательные движения. Так как цепь слуховых косточек обладает известной инерцией и очень легкой смещаемостью, то при перемещениях головы она несколько от них отстает, и таким образом осуществляется относительное перемещение подножной пластинки стремени по отношению к рамке овального окна. При таком механизме костной проводимости подвижность обоих окон так же необходима, как и при воздушной проводимости. Инерционный механизм костной проводимости играет большую роль при передаче по костям басовых звуков, так как при воздействии относительно медленных колебаний с большой амплитудой череп колеблется как одно целое.

2. Компрессионный тип костной проводимости имеет место при воздействии высоких звуков.

Под влиянием высоких звуков череп начинает колебаться отдельными сегментами, которые испытывают то сжатие, то ослабление давления. Такому же периодическому сжатию и ослаблению компрессии подвергается и лабиринтная капсула. В фазе сжатия лимфа испытывает давление со всех сторон и выпячивает мембраны обоих окон. Если бы они обладали одинаковым акустическим сопротивлением и одинаковой податливостью, то в равной степени выпячивались бы в сторону барабанной полости. В этом случае никакого изгиба основной перепонки не получалось бы, так как она испытывала бы одинаковое давление с обеих сторон. На самом же деле мембрана круглого окна гораздо податливее подножной пластинки (примерно в 7-8 раз), и поэтому она выпячивается гораздо больше, чем подножная пластинка. Очевидно, что в этом случае основная перепонка прогнется в сторону барабанной лестницы.

Этот механизм костной проводимости представляет большой интерес, так как он резко отличается от механизма воздушной проводимости. Основное значение здесь имеет не общая подвижность закрывающих окна образований, а различие в их подвижности. Поэтому фиксация одного из них (например, анкилоз стремени) даже способствует компрессионному механизму костной проводимости. Этим и объясняется резкое различие в порогах воздушной и костной проводимости при отосклерозе.

Сложные явления, наблюдаемые при костной аудиометрии, всегда должны рассматриваться с учетом этих двух механизмов. Обычно они действуют оба, но удельный вес каждого зависит от высоты и силы подаваемого звука, а также от изменений в звукопроводящем аппарате, в особенности от состояния окон.

## ФИЗИОЛОГИЯ ЗВУКОВОГО АНАЛИЗАТОРА

### НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ О ФИЗИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ ЗВУКОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Естественным, адекватным раздражителем звукового анализатора является звук: благодаря эластическим свойствам окружающей нас среды всякое перемещение частиц не остается локализованным, а передается на соседние частицы и дает начало волнообразному процессу, распространяющемуся далеко от места возмущения среды. Если отклонить, например, браншу камертона и затем ее отпустить, то она благодаря упругости быстро дойдет не только до первоначального положения, но по инерции отклонится в другую сторону. Это быстрое движение вызовет сгущение молекул столба воздуха, прилегающего к бранше камертона. В следующие доли секунды произойдет обратное движение бранши, причем в том участке, где только что произошло уплотнение, образуется разрежение воздуха. Участок же сгущения в это время успеет продвинуться на некоторое расстояние. Таким образом возникает последующий ряд сгущений и разрежений воздуха, т. е. звуковая волна.

Чем дальше уходит волна от источника колебаний, тем больше она вследствие трения теряет в силе и, наконец, полностью затухает (сила падает пропорционально квадрату расстояния).

Тела, которые производят соответствующие колебания, называются вибраторами. К ним относятся струны, колокола, голосовые связки — все, что рождает звуки.

Наиболее простым видом колебаний являются гармонические, или синусоидные, колебания. На примере камертона видно, что бранша его, отклоняясь от среднего положения, доходит до крайнего положения, ускоренно движется назад, по инерции проходит через среднее положение, замедленно движется к другому крайнему положению и т. д. Точно так же движется любой маятник, поэтому эти колебания называются маятникообразными.

Промежуток времени, в течение которого совершается одно колебание, называется периодом колебания, а число колебаний в секунду — частотой колебаний, или герц. Амплитуда колебания — это расстояние между средним и крайним положениями колеблющегося тела.

Звуки распространяются в среде с определенной быстротой, зависящей от плотности среды. В воздухе эта скорость (*V*) составляет 332 м/сек, скорость, которую превосходят современные реактивные самолеты. В воде скорость звука достигает 1450 м/сек.

Различаются поперечные и продольные волны. Поперечные хорошо видны при волнении воды, а также при колебании натянутой веревки. Воздушные звуковые волны — продольные, так как колебания частиц воздуха совершаются вдоль направления распространения волны.

Сила звука может быть определена по давлению, которое звуковая волна оказывает на пластинку, поставленную перпендикулярно к направлению распространения волны. Единицей давления считается *бар*; это давление 1 дины на 1 см2, оно соответствует примерно одной миллионной доле атмосферного давления.

Интенсивность звука характеризуется также энергией звука, т. е. той работой, которую он производит.

Единицей энергии (эрг) служит работа, которую производит сила, равная 1 дине, на пути в 1 см.

Эрги можно перевести в бары, а также в единицы мощности — ватты (1 бар равен 6,4 эрг, 1 Вт равен 107 эрг).

Важнейшую роль в акустике играют явления резонанса.

Если систему, способную к колебательным движениям, подвергнуть периодически действующей силе, например звуковой волне, то система придет в колебание, причем амплитуда колебаний будет разной для разных частот. Она будет наивысшей, когда собственный период колеблющейся системы совпадает с периодом воздействующей силы. Определяя амплитуду колебаний под влиянием звуков различной частоты, можно построить кривую резонанса. Каждое тело имеет свою кривую резонанса; камертоны дают резонансную кривую, которая очень резко поднимается до максимума и быстро падает. Такие вибраторы обладают острым резонансом; характерным для них является то, что амплитуда колебаний их мало уменьшается со временем, т. е. они дают медленно затухающие колебания.

Наоборот, если ударить по барабану, то его колебания быстро затухают, а кривая резонанса имеет пологий вид (пример тупого резонанса).

Важно, что колебания структур уха, проводящих звук, быстро затухают; благодаря этому внешний звук не искажается, и человек может быстро, последовательно принимать все новые и новые звуковые сигналы. Структуры же внутреннего уха должны обладать острым резонансом, так как этим определяется способность различения двух близко расположенных частот.

Звуки окружающей нас природы, как правило, бывают сложными, т. е. они дают не синусоидную, а более сложную кривую, которая, однако, характеризуется периодичностью, т. е. повторением отдельных периодов. Зависит это от того, что звучащие предметы колеблются не только как целые тела, но и как части их. Например, струна, вибрируя целиком, дает 100 Гц; но колебания совершают и половинки струны, причем эти колебания совершаются в 2 раза быстрее (200 Гц). Колокол колеблется не только целиком, но и отдельными сегментами.

Согласно Фурье, любая сложная кривая, характеризующаяся периодичностью, всегда состоит из суммы синусоид, каждая из которых может быть выделена, изолирована. Наиболее медленное колебание соответствует основному звуку, остальные называются обертонами — гармониками.

Особенно сложным составом обладают звуки человеческой речи.

Следует обратить внимание на то, что вид звуковой кривой при суммации одних и тех же составных синусоид меняется при сдвиге фаз. Для примера возьмем наиболее простой случай, когда сложный звук содержит только основной тон (*1*) и первую гармонику (*2*) с двойным числом колебаний.

При сложении этих кривых получается сложная кривая звука, которая имеет другой вид при сдвиге фазы обертона — *II* (*2*). Гельмгольц утверждал, что ухо не различает сдвига фаз в сложном звуке; звуки, соответствующие кривым 3 на рис. 18, являются для нас звуками одинаковыми.

Сказанное позволяет заключить, что ухо воспринимает сложный звук, разложенный на составные синусоиды. Поэтому основное требование к любой теории слуха — дать объяснение этому свойству, т. е. раздельному восприятию отдельных составных частей сложного звука.