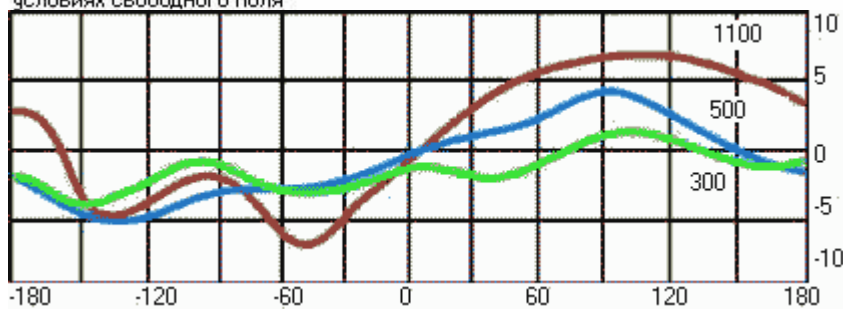


Рис 1 Кривая порогов абсолютной слуховой чувствительности, измеренная в условиях свободного поля



: архив : архив журнала  
 "Звукорежиссер" : 2000 :  
 №4

## часть 8 Слуховые пороги, часть 1

Ирина Алдошина

Исследования способности слуховой системы воспринимать и преобразовывать в определенные слуховые ощущения (громкость, высоту, тембр и др.) основные объективные параметры звукового сигнала, такие, как

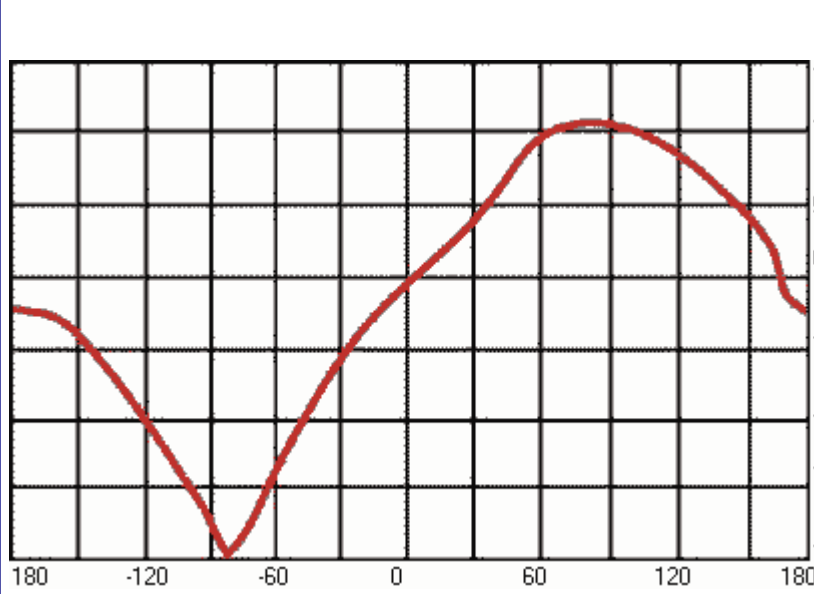
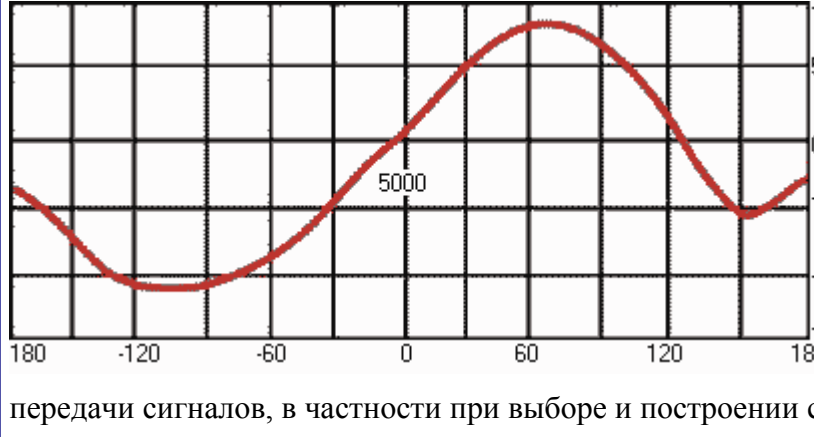
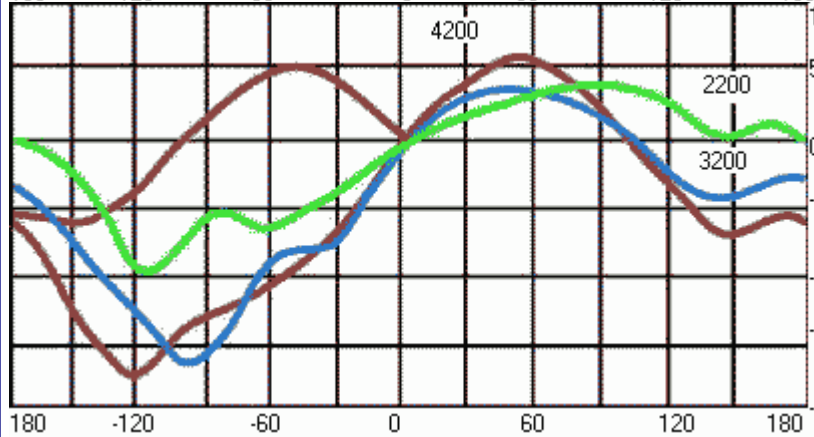
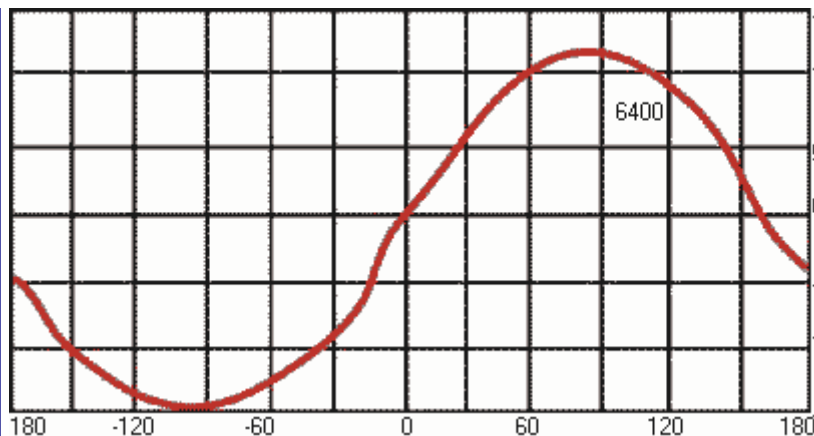
интенсивность звука и пределы ее изменения (динамический диапазон), частотный диапазон, временные характеристики и т.д., является главной задачей современной психоакустики.

Слуховая система \* чрезвычайно тонкий аппарат, но она имеет

ограничения в восприятии частотного, динамического диапазона, в разрешающей способности, обладает нелинейными свойствами, очень чувствительна к перегрузкам и т. д.

Установление пределов возникновения слуховых ощущений, называемых слуховыми порогами, является в настоящее время одной из самых актуальных проблем в аудиотехнике, поскольку ее технические возможности значительно выросли за последние десятилетия, а возможности слуховой системы практически не изменились (а чувствительность даже несколько снизилась).

Современные системы звукозаписи и звуковоспроизведения, все звенья \* от микрофона до громкоговорителя \* проделали большой путь в деле усовершенствования параметров, и приблизились к порогам ощущений.



Идеология построения звуковой аппаратуры категории Hi-Fi (high-fidelity) состоит в обеспечении качества звучания, максимально близкого к живому звуку. Начиная с пятидесятых годов, времени появления Hi-Fi, в проектировании аудиоаппаратуры \* акустических систем, микрофонов, усилителей и др. \* произошли большие изменения в конструировании, технологии изготовления, компьютерном моделировании, технике измерений и т.д. Дальнейшее развитие звуковой техники зависит от успехов психоакустики, поскольку не имеет никакого смысла вкладывать средства в усовершенствование параметров (неравномерность АЧХ, нелинейные искажения и др.), если они уже достигли порогов слышимости. Поэтому надо точнее определить пороги слышимости основных видов искажений, и направить усилия на поиск новых значимых для слуховой системы параметров. Точное определение слуховых порогов имеет принципиальное значение для современных систем цифровой обработки и передачи сигналов, в частности при выборе и построении систем сжатия и цифрового кодирования (стандарты MPEG и др.).

Широкое развитие систем пространственной передачи (Dolby Surround, бинауральной стереофонии и т.д.) также требует установления интенсивностных и частотных слуховых порогов, так как они определяют точность пространственной локализации.

Все современные звуковые системы обработки и передачи музыкальных и речевых сигналов вносят определенные

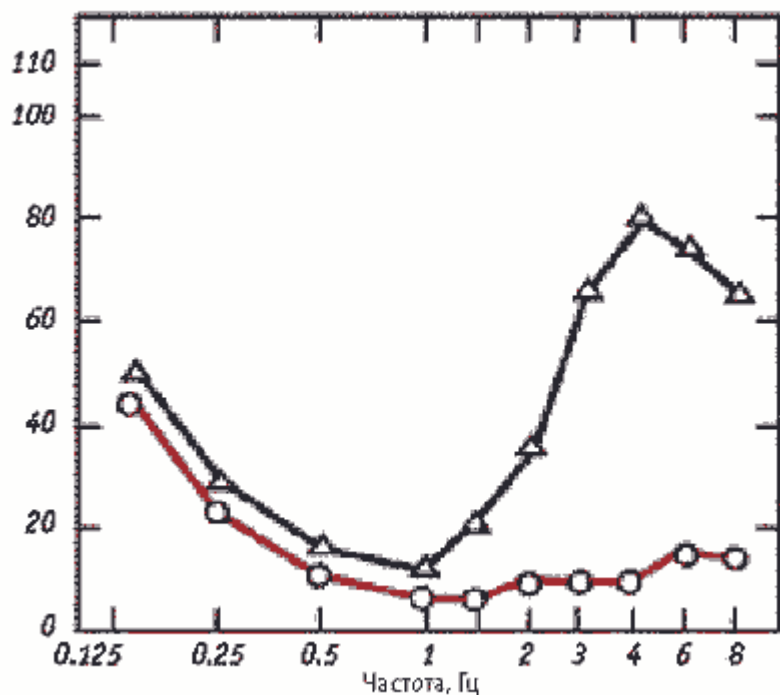


Рис 4а Аудиодиаграммы, снятые относительно нулевого уровня (в ртомки обирит ели)

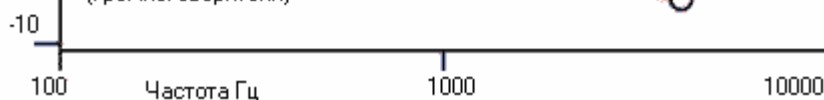


Рис 3 Кривые порогов слышимости а - при измерении в свободном поле б - через наушники

искажения в обрабатываемый сигнал. Главная задача их проектирования состоит в том, чтобы эти искажения были незаметны для слуха, т. е. лежали ниже порогов слуховой чувствительности.

Поэтому знание слуховых порогов имеет огромное значение для современной звукотехники, а, соответственно, и для работы звукорежиссера.

Слуховые пороги определяются минимальным значением объективного параметра звукового сигнала, при котором возникают слуховые ощущения. Они характеризуют чувствительность слухового аппарата к данному параметру \* чем ниже слуховой порог, тем выше чувствительность.

Установленная в результате многолетних исследований картина слуховой чувствительности показывает огромные возможности слуховой системы:

- ухо человека улавливает звук, интенсивность которого 10-12вт/м<sup>2</sup>, т.е. 0 дБ (звуковое давление 2.10-5Па), с другой стороны оно ощущает как звук уровень давления 140 дБ - это соответствует отношению давлений 10<sup>7</sup> степени. Самый громкий звук в 10 миллионов раз больше по звуковому давлению самого слабого;

- по частоте человек улавливает и очень низкие звуки, от 20 Гц и очень высокие, до 20 кГц (хотя музыкальные звуки в основном в диапазоне до 5000 Гц).

Необычайна чувствительность слуха к временным различиям (форме волны) и длительности звука. Чувствительность слуха к частоте, интенсивности и длительности связаны друг с другом. Слуховой аппарат имеет удивительную дифференциальную способность обнаруживать небольшие различия между сходными звуками по всем параметрам: интенсивности, частоте, временной структуре и длительности. Без этого невозможно было бы восприятие речи.

### Абсолютные слуховые пороги

Не всякие изменения давления воспринимаются слухом как "звук" - существуют определенные границы слухового ощущения как по величине давления, так и по частоте. Эти ограничения зависят от уровня слуховых порогов.

Слуховые пороги могут быть разделены на абсолютные и дифференциальные.

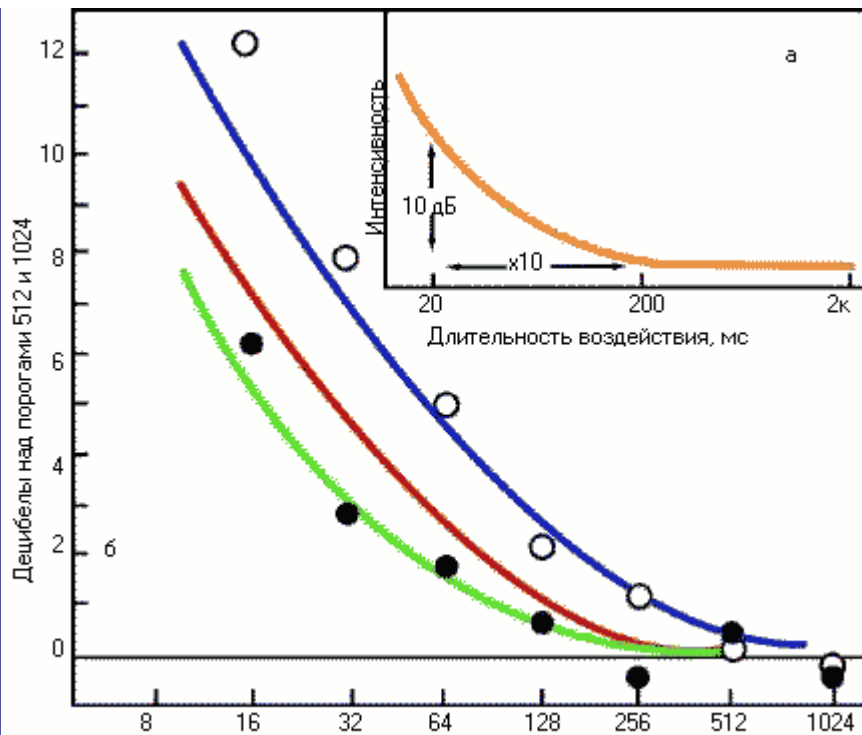


Рис 5 Зависимость порогов слышимости от длительности сигнала при разных частотах

Например, "абсолютный порог слышимости определяется как минимальное звуковое давление (в дБ), при котором еще возникает слуховое ощущение". Он характеризует чувствительность слуха к интенсивности звуковой энергии. Аналогично определяются абсолютные слуховые пороги по частоте и по временному интервалу.

Дифференциальные слуховые пороги характеризуют способность слуховой системы определять пороговое различие между звуковыми сигналами по частоте, по

уровню звукового давления, по временному интервалу и др.

Опыты по определению абсолютного порога слышимости показали, что его величина зависит от условий опыта, особенностей звукового сигнала, параметров звукового источника и др.

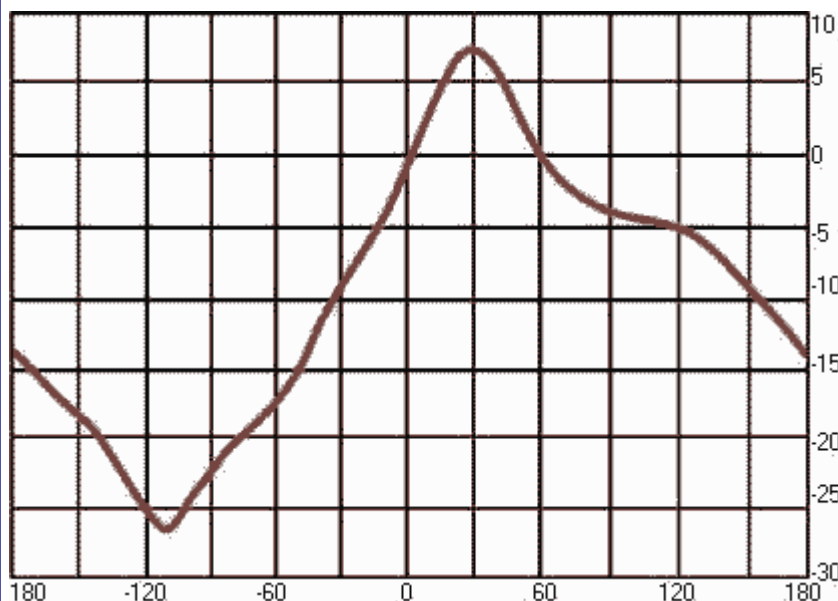
Под условиями опыта понимается характер звукового поля:

- создается ли оно одним громкоговорителем, помещенным перед слушателем, или многими источниками, равномерно распределенными вокруг головы;

- имеются ли отражения от границ помещения или приняты меры по их устранению;

- производились ли измерения минимального давления непосредственно около ушной раковины или в этой же точке при отсутствии слушателя (т. е. в свободном поле);

- предъявлялись ли сигналы через громкоговорители или через телефоны.



Обычно пользуются результатами измерений, полученными двумя основными методами.

Первый: для свободного звукового поля (т.е. в заглушенной камере), формируемого одним

излучателем, помещенным перед слушателем. Уровень звукового давления определяется микрофоном, помещенным в точку расположения головы слушателя. Измерение порога слышимости производится по методу так называемого балансного регулирования. Испытуемый имеет возможность с помощью переключателя менять направление изменения интенсивности звука, уменьшая его до уровня, когда тон становится неслышимым, и повышая до уровня, когда тон становится слышимым. Следовательно, регулируемый тон балансирует между значениями "слышен" и "не слышен". Измерения проводятся на различных частотах, при этом на каждой частоте определяется полученный уровень. Описанные измерения должны быть проделаны с участием многих испытуемых, обладающих здоровым слухом, как тренированных (которые дают меньшие значения порогов), так и нетренированных.

Полученная таким способом кривая порога слышимости синусоидальных звуков, измеренная в условиях свободного поля, показана на рис. 1. Как видим, порог слышимости меняется в очень широких пределах в зависимости от частоты. Наибольшей чувствительностью ухо обладает в области частот 2500...3500 Гц, где порог слышимости имеет наименьшую величину. В области максимальной чувствительности слух воспринимает давление около 10-5 Па. Любопытно отметить в связи с этим, что звуковое давление, возникающее вследствие флюктуаций плотности воздуха, имеет при температуре 25°C величину  $5 \times 10^{-6}$  Па. Если бы ухо было вдвое чувствительней, оно слышало бы непрерывный шум флюктуаций молекул воздуха и тока крови. Таким образом, чувствительность слуха находится на пределе биологической целесообразности.

Таблица 1

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

Следует отметить, что при бинауральном слушании слуховые пороги на 3 дБ ниже, чем при моноуральном.

В международном стандарте ISO/R-226 (таблица 1) приняты за стандартные следующие значения порогов слышимости (громкоговоритель размещен в свободном поле на оси, слушатели в возрасте 18...30 лет):

Таблица 2

Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень, дБ	45	25,5	11,5	7,0	9,0	9,5	13,0

Представленные на рисунке 1 и в таблице 1 значения абсолютных порогов слышимости относятся к случаю, когда источник-громкоговоритель размещен на оси 00. Если перемещать громкоговорители под разными углами относительно головы слушателя, то абсолютные пороги существенно меняются. Значения порогов на различных частотах при разных углах размещения громкоговорителя показаны на рис.2. За нулевой уровень принято значение слухового порога, измеренного на оси 00. Как следует из этих кривых, абсолютные пороги слышимости существенно меняются в зависимости от азимутального положения источника звука, и могут быть на некоторых частотах существенно ниже, чем на оси. Это объясняется фильтрующим влиянием ушной раковины и головы за счет дифракционных эффектов.

Таблица 3



SPL, дБ	90	92	95	97	100	102	105	110	115
T, часов в день	8	6	4	3	2	1,5	1	0,5	0,25

Второй метод \* сигналы подаются на наушники, звуковое давление измеряется в слуховом проходе у барабанной перепонки. Кривые порогов слуховой чувствительности получаются несколько разными (рис.3): пороги при предъявлении сигнала через телефоны получаются выше, то есть слуховая система более чувствительна к сигналам, поступающим из внешнего пространства. Это объясняется тем, что за счет дифракции и резонансов ушной раковины, а также резонансов слухового канала, звуковое давление у барабанной перепонки усиливается в 2...3 раза, особенно в области частот 1500...3000 Гц, именно поэтому в области частот, совпадающей с резонансами слухового канала (~2700 Гц), и находится абсолютный порог слышимости слуховой системы.

При повышении и понижении частоты чувствительность слуха снижается и пороги слышимости соответственно повышаются.

В стандарте ANSI-89 для стандартных уровней слуховой чувствительности, используемых при калибровке аудиометров (приборов, измеряющих пороги слышимости), приняты следующие величины (при измерении на наушниках):

Абсолютные пороги слышимости существенно отличаются у индивидуальных слушателей в зависимости от возраста, состояния слуховой системы, наличия заболеваний и т. д. Для их оценки измеряются индивидуальные слуховые пороги и строится аудиограмма \* график зависимости слуховой чувствительности от частоты. Она может быть построена как относительно абсолютных порогов, так и относительно нулевого уровня, за который приняты значения порогов из таблицы 2. Оба вида аудиограмм представлены на рисунках 4а и 4б.

Необходимо отметить, что всем, кто регулярно работает со звуком, в первую очередь музыкальным экспертам, звукорежиссерам и пр., необходимо регулярно снимать аудиограмму (для экспертов стандартом была установлена периодичность два раза в год). Для автоматического снятия аудиограмм в Интернете имеется специальная программа <http://www.digital-recording.com/audiometri/audiomtr.htm> (можно попробовать).

Абсолютные пороги слышимости зависят от длительности предъявляемого сигнала: если длительность сигнала мала (меньше 250 мс), пороги возрастают (рис. 5), и только при длительности больше 250 мс значения слуховых порогов стабилизируются к норме.

Если звуки имеют очень короткую длительность, то они воспринимаются как короткий щелчок. Требуется определенное время воздействия, чтобы можно было определить высоту тона, причем длительность этого отрезка времени зависит от частоты: при частоте 50 Гц требуется 60 мс, свыше 1000 Гц - 10 мс. Соответственно этому меняются, в зависимости от частоты, и уровни абсолютных порогов слышимости. Сокращение длительности воздействия с 200 до 20 мс на частоте 1000 Гц приводит к возрастанию порога на 10 дБ.

Это связано с особым свойством слуховой системы, называемым временной интеграцией (или суммацией). Слуховой аппарат работает как детектор энергии внутри определенного слухового окна длительностью примерно 200 мс. Требуется накопить определенное количество энергии внутри этого окна для достижения порога слышимости, причем чем короче сигнал, тем больше должна быть интенсивность звука, чтобы его можно было услышать, и наоборот. Ухо интегрирует энергию внутри этого временного окна, поэтому период времени 200 мс считается постоянной интегрирования слухового аппарата.

## Болевой порог и область слышимости

Существует ограничение области слухового восприятия и со стороны громких звуков, хотя и не такое четкое, как порог слышимости. Например, синусоидальное звуковое давление с эффективным значением  $p \sim 10$  Па (100 дБ) соответствует одному из порогов, называемому порогом неприятного ощущения. При достижении величиной  $p$  значения 60...80 Па (132 дБ) возникает ощущение давления на уши, подобное тому, которое бывает при закладывании ушей в самолете, а также неприятного щекотания в ухе. Эта величина называется порогом осязания. Наконец, давление 150...200 Па (140 дБ) причиняет боль и называется болевым порогом. Частотная зависимость болевого порога приведена на рис. 6.

Таким образом, динамический диапазон слуховой системы достигает 140 дБ, при этом акустическая мощность увеличивается в 45 раз. Существующая техника звукозаписи и звукопередачи, даже цифровая, еще не может обеспечить такую величину динамического диапазона сигнала. (Правда, имеются рекламные данные о микрофонах, способных обеспечить такой динамический диапазон, например микрофон 4138 фирмы V&K).

Нужно отметить, что слуховая система приспособлена к восприятию в основном тихих звуков и звуков средней интенсивности. Воздействие громких звуков (с уровнем выше 90 дБ) приводит к изменению порогов слуха и к необратимым изменениям свойств слуховой системы, вплоть до полной глухоты. Причем степень повреждения пропорциональна времени воздействия громких звуков, поэтому международные стандарты (таблица 3) регламентируют допустимое время пребывания (Т час/день) в звуковой среде с высокими уровнями звукового давления, выше которых могут произойти необратимые изменения слуховой чувствительности:

Эта проблема особенно актуальна для звукорежиссеров, работающих достаточно длительное время с программным материалом с высокими уровнями звукового давления, а также для современной молодежи, испытывающей огромные перегрузки слухового аппарата на современных концертах и дискотеках, при прослушивании музыки на плеерах с ушными телефонами. Исследования, выполненные корпорацией BBC, показали, что уровни абсолютной слуховой чувствительности значительно снизились у молодежи за последние десятилетия.

Нередко после воздействия громких звуков высокой интенсивности у человека резко снижается слуховая чувствительность. Процесс восстановления обычных порогов может продолжаться до 16 часов.

Этот процесс называется "временный сдвиг порога слуховой чувствительности" или "постстимульное утомление". Сдвиг порога начинает появляться при уровне звукового давления выше 75 дБ и соответственно увеличивается при повышении уровня сигнала. Причем наибольшее влияние на сдвиг порога чувствительности оказывают высокочастотные составляющие сигнала. Величина сдвига порогов пропорциональна логарифму времени воздействия \* поэтому и нормируется время прослушивания в день. Если измерять пороги чувствительности в разные сроки после выключения сигнала, то можно установить, что пороги начинают плавно снижаться, но примерно через две минуты происходит скачок в ходе восстановления чувствительности, а затем пороги продолжают плавно уменьшаться со скоростью, пропорциональной логарифму времени после выключения звука. Однако если время нахождения под воздействием громких звуков превышает допустимые нормы, то полного восстановления порогов чувствительности не происходит, постепенно чувствительность слуха снижается, что может привести к полной глухоте, особенно опасной, потому что она связана с повреждением волосковых клеток и поэтому практически не

поддается лечению.

### **Абсолютные частотные пороги**

Если на рисунке 6 посмотреть на кривые болевых порогов и кривые абсолютной слышимости, то можно видеть, что если продолжить эти кривые, то они как бы пересекаются, т.е. чтобы достичь порогов слышимости на самых низких и самых высоких частотах, требуются уже настолько высокие уровни, что они совпадают сразу с болевыми пороговыми уровнями, не создавая ощущения звука.

Таким образом, только звуки, попадающие в диапазон частот 20...20000 Гц, воспринимаются в виде слуховых ощущений. Нужно отметить, что природа не наградила нас особенно острым слухом на высоких частотах, особенно если сравнить с собакой или кошкой, которые слышат до 60000 Гц, или дельфином (до 100000 Гц). Наверное, природа решила, что в этом нет никакой необходимости.

Измерения показали, что звуки с частотой 20 кГц могут услышать только очень редкие люди в очень молодом возрасте. В среднем чувствительность слуха к высоким частотам снижается каждые 10 лет на 1000 Гц. Примерно к 60 годам средний порог по высоким частотам составляет 12 кГц у женщин, у мужчин снижение частотных порогов происходит быстрее и часто составляет 5...6 кГц.

Однако если посмотреть на рис.6, то можно увидеть, что музыкальные и речевые сигналы занимают только часть слышимой области, как по частоте, так и по амплитуде. Основная энергия музыкальных звуков находится в частотной области от 40 до 5000 Гц, и по уровню звукового давления от 40 до 100 дБ, поэтому возрастное изменение частотных порогов приводит к некоторому уменьшению яркости звучания обертонов, но не мешает слушать музыку и речь, тем более что часто это дополняется большим музыкальным опытом.

Закончив на этом рассмотрение абсолютных порогов, во второй части статьи перейдем к рассмотрению дифференциальных порогов.