

ПРИРОДА

117049 Москва, Мароновский пер., д. 26
тел. : [095] 238-24-56; e-mail: byalko@landau.ac.ru

№ 5 - 1999 г.

А.Я. Супин

Как измерить остроту слуха

© Природа

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!
<http://www.techno.ru/vivovoco>



Как измерить остроту слуха?

А. Я. Супин

Александр Яковлевич Супин, доктор биологических наук, профессор, руководитель лаборатории эволюции сенсорных систем Института проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН. Область научных интересов — нейрофизиология мозга человека и морских животных.

ПРОБЛЕМА

Дефекты слуха, возникающие из-за врожденных аномалий, болезней, преклонного возраста, — сущий бич для миллионов людей. Для многих из них единственным средством помощи остается слуховой аппарат — нехитрое электронное устройство, предназначенное для усиления звука. Но беда в том, что, усиливая громкость звука, слуховые аппараты не делают его более разборчивым: многие владельцы слуховых аппаратов жалуются, что слышат звук, но ничего не могут разобрать в той какофонии, которая слышится из наушника, не могут понять речь собеседника, выделить ее из фоновых шумов. И это вовсе не из-за плохого качества аппарата, а из-за принципиальной проблемы: слуховые усилители компенсируют потерю чувствительности слуха, но не потерю его разрешающей способности, т.е. способности различать звуки. А именно эта способность больше всего страдает при дефектах слуха.

Чтобы создавать приборы, которые могут не только усиливать звуки, но и обеспечивать сносную возможность их различения, нужна, помимо прочего, точная диагностика: измерение как чувствительности, так и разрешающей способности слуха пациента. Что касается чувствительности, то здесь нет проблем: аудиометр — прибор для тестирования чувствительности слуха — есть в любом приличном аудиологическом кабинете. С измерением же разрешающей способности дело обстоит куда хуже.

До сих пор основным методом оценки этого свойства слуха остается так называемая речевая аудиометрия. Всякий, кто бывал на обследовании у отоларинголога, знает, что это такое. Врач шепчет какие-то слова и просит пациента повторить их. Может пациент повторять слова — слух хорош, не может — плох. Достоинство такой процедуры — ее простота, но больше ничего хорошего в ней, пожалуй, нет. Ведь успешность повторения слов зависит не только от остроты слуха пациента, но и от дикции врача, используемых слов (одни звуки распознаются легче, другие — труднее), знакомства пациента с набором слов (можно угадать слово по его части) и множества других причин, к слуху никак не относящихся. Конечно, можно использовать записанные на магнитофон стандартные наборы слов, произносимых профессиональными дикторами, с выверенной громкостью. Но все это — полумеры. Ведь такой способ в принципе не дает оценку разрешающей способности слуха в строгих физических единицах.

Между тем для современной физиологии вовсе не секрет, чем обусловлена разрешающая способность слуха. Орган слуха начинает анализ звуков с того, что разлагает их на составляющие частоты. Чувствительные слуховые клетки настроены каждая на свою частоту: если сигнал содержит некоторую частоту звуковых колебаний, то откликается соответствующая группа клеток. Чем острее частотная настройка, тем тоньше, детальнее анализ. При многих дефектах слуха острота частотной настройки падает, из-за этого и снижается способность отличать одну частоту от другой, один звук от другого, сигнал от шума.

Все это известно. И есть способы измерения остроты частотной настройки слуха. Большинство из них основано на эффекте маскировки, суть которого проста. При одновременном включении двух звуковых сигналов — тихого и громкого — тихий звук (тест)

будет заглушен, замаскирован громким (маскером). Но эффективность маскировки зависит от соотношения частот маскера и теста. Если эти частоты близки, то маскировка происходит даже при не очень большой громкости маскера, потому что и маскер, и тест воздействуют на одни и те же чувствительные клетки. Когда частоты различны, маскировка слабее, и чтобы заглушить тест, нужен намного более громкий маскер. Если показать на графике, как эффективность маскировки зависит от частоты, то получится V-образная кривая (рис.1); она то и показывает остроту частотной настройки: чем кривая уще, тем настройка острее. А для полноты картины нужно построить много таких кривых, используя разные тестовые частоты. Вообще-то в современных исследованиях используются разные, в том числе весьма изощренные, сигналы со сложным частотным составом, но основной принцип метода именно таков. Если же известно, как измерить остроту частотной настройки слуха, то почему это не применяется на практике? Видимо, вследствие громоздкости метода. Измерения такого рода называют многоточечными, потому что для получения одного значения остроты частотной настройки нужно выполнить много измерений, чтобы по полученным точкам провести кривую, как на рис.1, и оценить ширину этой кривой. А ведь каждая точка кривой тоже добывается в результате многих проб, в которых испытывают маскиры разной громкости. И кривых таких нужно получить не одну, а несколько (на разных тестовых частотах). В результате объем измерений растет, как снежный ком. Для исследовательских целей, когда можно многократно работать с постоянными испытуемыми, постепенно накапливая необходимый объем данных, это приемлемо. Но в практических условиях затевать такую канитель, чтобы обследовать слух у пациента, — мало реально.

К тому же острота частотной настройки — важный, но не единствен-

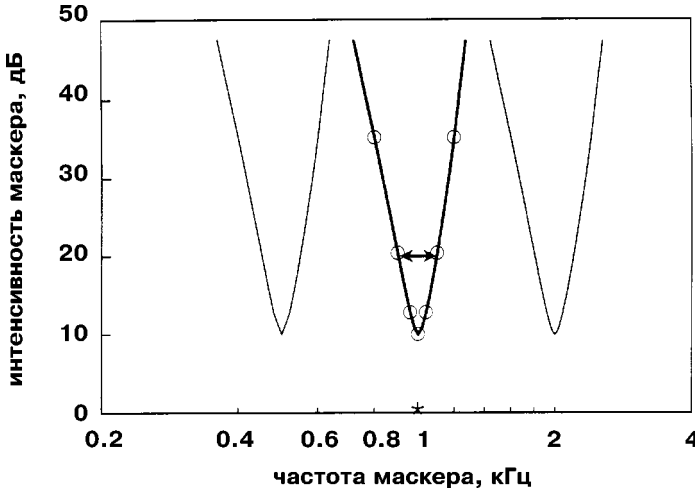


Рис.1. Кривые, построенные по результатам измерения остроты частотной настройки слуха методом маскировки. На кривой (в центре) показано, с какой интенсивностью должен звучать маскирующий сигнал для того, чтобы заглушить тестовый на частоте 1 кГц (отмечен звездочкой). Ширина кривой на некотором стандартном уровне — показатель остроты частотной настройки (отмечен стрелками). Полное исследование предполагает построение еще нескольких таких кривых при других частотах тестовых сигналов.

ный фактор, определяющий остроту слуха. Она не всегда позволяет предсказать, как будет восприниматься сигнал сложного частотного состава. Дело в том, что возможны сложные взаимодействия между нервными клетками: отклик каждой из них на звуковой сигнал зависит не только от ее собственных свойств, но и от того, что происходит в соседних клетках. Ситуация в целом получается трудно предсказуемой.

ИДЕЯ

А что если не вырисовывать отдельные кривые частотной настройки и не пытаться по ним предсказать результат анализа сложных звуков, а попробовать сразу получить конечный результат: тестировать слух сложными сигналами и измерять способность к их различению? За аналогией далеко ходить не нужно: достаточно из кабинета врача-отоларинголога перейти в кабинет окулиста. Там оценка остроты, т.е. разрешающей способности, зрения — первейшая процедура. При этом измеряется именно способность различать реальные изображения. Можно ли опыт, накопленный в физиологии зрения, использовать для диагностики слуха? Можно, несмотря на

множество принципиальных различий между зрительной и слуховой системами. Эта идея и легла в основу нашей работы.

Как измеряют остроту зрения? Самый строгий способ — тестировать зрение с помощью изображений-решеток, которые состоят из чередующихся светлых и темных полос (рис.2). Испытуемому показывают решетки с разной частотой полос. Если частота решетки невелика, то испытуемый видит, что это полосатый рисунок, а не ровный фон. Если же частота выше некоторого предела, полосы становятся неразличимыми, сливаются в ровный серый фон. Максимальная частота полос, при которой еще различается решетчатый рисунок, — строгая мера остроты зрения. Ответ получается в точных физических единицах: количестве циклов решетки на градус угла поля зрения.

Но как установить, какую частоту решетки испытуемый различает, а какую — нет? Простейший способ — придать рисунку из темных и светлых полос вид узнаваемой фигуры, например буквы: если пациент сумеет правильно назвать букву, значит различает рисунок. Но такое упрощение идет в ущерб точности: в букве или картинке расстояние между полосами не

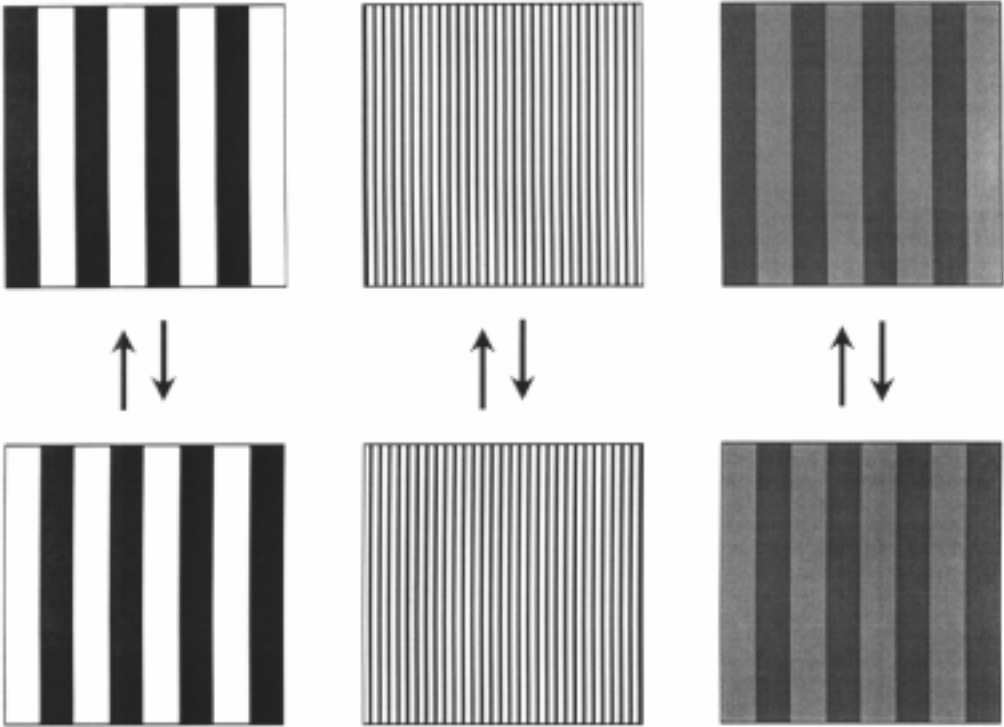


Рис. 2. Изображения-“решетки”, используемые для тестирования остроты зрения. На левой паре “решеток” полосы расположены редко, поэтому замена одной “решетки” на другую хорошо заметна. Средняя пара – “решетки” с высокой частотой полос; если смотреть с большого расстояния, то полосы сольются в серый фон, и подмена останется незамеченной. На “решетках” правой пары полосы, хотя и расположены с низкой частотой, мало контрастны; если контраст еще понизить, то смена одной “решетки” на другую тоже будет не заметна. Цель этих измерений состоит в том, чтобы найти пороговый контраст для тест-объектов с разной частотой полос, а также предельную различимую частоту “решетки” и тем самым получить полный и точный показатель разрешающей способности зрения.

может быть везде одинаковым, как в простой решетке. Есть, однако, изящный прием, позволяющий точно сказать, различает ли испытуемый решетчатый рисунок. Это проба на инверсию фазы решетки. Испытуемому показывают решетку определенной частоты, и в некоторый момент светлые и темные полосы этой решетки меняются местами (рис.2). Если рисунок решетки различим, то испытуемый увидит, что что-то сдвинулось, изменилось на экране. Если же полосы не различимы, то испытуемый в этот момент не заметит ничего: ведь за исключением положения полос, решет-

ки до и после замены абсолютно одинаковы, так что серый фон, в который слились полоски, каким был, таким и останется. Итак: предельная частота решетки, при которой можно заметить инверсию ее фазы, – точная мера остроты зрения.

Этот же прием позволяет измерить и другой важнейший показатель – контрастную чувствительность. Можно менять не частоту полос решетки, а контрастность рисунка. Минимальный (пороговый) контраст, при котором различима инверсия фазы решетки, укажет, какова контрастная чувствительность. А чтобы провести из-

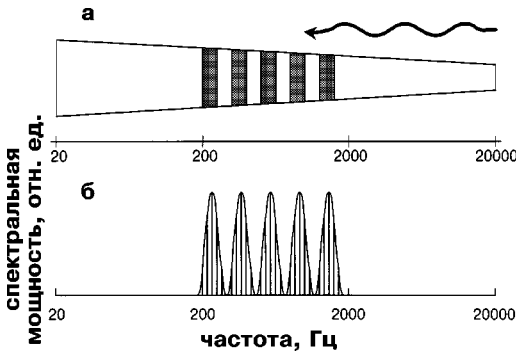


Рис. 3. Рецепторная поверхность органа слуха (кортиева орган) схематически представлена в виде полоски, вдоль которой распространяются звуковые волны (вверху). Каждая точка (чувствительная слуховая клетка кортиева органа) реагирует на звук своей частоты, так что вся шкала звуковых частот (от 20 до 20 тыс. Гц) представлена вдоль полоски. Чтобы создать "решетку" из возбужденных и невозбужденных участков (темные и светлые участки), нужно воздействовать звуком, в частотном спектре которого есть пики и провалы на соответствующих частотах.

мерение во всей полноте, можно варьировать и контраст, и частоту решетки. Зависимость порогового контраста от частоты решетки (частотно-контрастная кривая) — полный и точный показатель разрешающей способности зрения.

Можно ли так же просто и строго, используя тот же оправдавший себя прием, измерять разрешающую способность слуха? Попробуем сделать это. Для начала разберемся, какие сигналы играют для слуха ту же роль, что контрастные решетки для зрения.

Уже говорилось, что первейшая операция, выполняемая ухом, — разложение звука на составляющие его частоты. Рецепторная поверхность органа слуха (кортиева орган) устроена так, что разные ее точки откликаются на разные звуковые частоты, так что вдоль рецепторной поверхности представлена вся шкала звуковых частот: на одном конце — самые высокие частоты, на другом — самые низкие. Что же нужно сделать, чтобы на этой по-

верхности появилась "решетка" — чередующиеся участки возбужденных и невозбужденных клеток? Ответ очевиден: нужно воздействовать таким звуком, в частотном спектре которого представлены периодически чередующиеся пики и провалы (рис.3). А чтобы измерить разрешающую способность слуха, нужно менять расстояние между спектральными пиками, т.е. "плотность" спектральной решетки, и найти тот предел, при котором ухо еще способно различать, что спектр

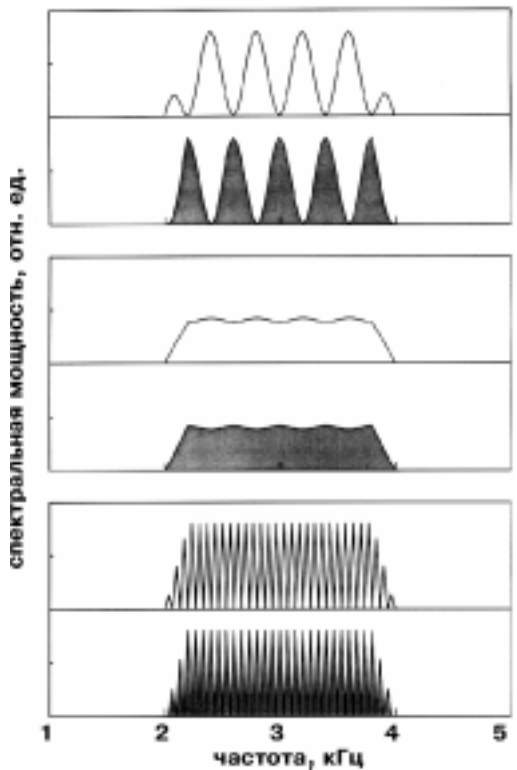


Рис. 4. Спектры сигналов, используемые для измерения разрешающей способности слуха. Верхняя пара — прямая и инверсная спектральные решетки с низкой плотностью и высоким контрастом пиков и провалов звукового сигнала. Если один сигнал заменить на другой, это хорошо слышно. Средняя пара — спектры с низким контрастом; в этом случае замену одного сигнала на другой уловить трудно. Внизу — спектры с высоким контрастом, но и с высокой плотностью пиков: пики сливаются в сплошной спектр, поэтому замену одного сигнала другим тоже трудно услышать.

сигнала не сплошной, а "решетчатый". Если же хотим измерить еще и контрастную чувствительность, будем менять "контраст" спектральной решетки, т.е. высоту пиков и глубину провалов, и найдем тот порог, при котором "решетчатый" спектр отличим от равномерного (рис. 4).

Тут нужно небольшое пояснение: применительно к спектральным решеткам мы использовали термин "плотность", тогда как для зрительных решеток мы говорили об их частоте. По сути это совершенно одно и то же, но дело в том, что применительно к звуку термин "частота" используется для обозначения частоты звуковых волн. Чтобы избежать путаницы, условимся для спектральных решеток использовать термин "плотность", считая, что эта величина тем выше, чем меньше частотный интервал между пиками (пики расположены плотнее).

Но как узнать, различает ухо "решетчатый" рисунок спектра или нет? Да точно так же, как и для зрения: используя тест инверсии фазы решетки (рис.4). Включим звуковой сигнал, имеющий "решетчатый" спектр. (Кстати, все сигналы с более или менее широким частотным спектром воспринимаются как шумы различного тембра; так же звучит и наш сигнал.) Затем неожиданно заменим его на другой — тоже "решетчатый", с той же шириной спектра, той же громкости, но с противоположным положением спектральных пиков и провалов на частотной шкале. Он тоже звучит как шум, но с чуть другим тембром. Услышал испытуемый, что в звуке что-то изменилось, — значит, смог различить спектральную структуру сигнала. Если же плотность пиков настолько велика, что они сливаются для него в сплошной спектр, или контраст решетки слишком мал — испытуемый не уловит никакого изменения: ведь за исключением положения спектральных пиков на частотной шкале, сигналы до и после переключения абсолютно идентичны.

Итак, показатели разрешающей способности слуха — та максималь-

ная плотность спектральной "решетки" и тот минимальный ее контраст, при которых улавливается инверсия фазы этой "решетки".

Чем привлекателен такой способ измерения остроты слуха?

Во-первых, в отличие от речевой аудиометрии, это строгий аппаратурный метод, и результат он дает в точных физических единицах: плотность спектральных пиков выражается в их количестве на 1кГц или как отношение частоты к интервалу между пиками, а контраст решетки — в процентах отклонения ее пиков и провалов от среднего уровня.

Во-вторых, для тестирования используются сигналы со сложным спектральным составом (т.е. сходные с естественными звуками), поэтому результат отражает реальную разрешающую способность слуха.

В-третьих, это одноточечный метод: чтобы получить одно значение разрешающей способности, достаточно найти лишь один порог восприятия изменения спектральной "решетки", а не много порогов маскировки.

В-четвертых, процедура измерения предельно проста для испытуемого. От него не требуется как-то оценивать характер слышимых звуков, надо лишь ответить на простой и понятный вопрос: заметил ли он хоть какие-то изменения в предъявляемых сигналах?

Несомненно, этот достаточно простой и быстрый метод захотелось сразу использовать в практических целях для индивидуальной диагностики. Однако предстояло еще во многом разобраться.

РЕЗУЛЬТАТ

Основная идея метода была опубликована¹ еще в 1984 г., но, чтобы довести ее "до ума", надо было сделать

¹ Попов В.В., Супин А.А. // Докл. АН СССР. 1984. Т.278. С.1012-1016; Супин А.А., Попов В.В. // Физиология человека. 1987. Т.13. С.28-34; Супин А. А., Попов В.В. // Сенсорные системы. 1987. Т.1. № 2. С.191-198.

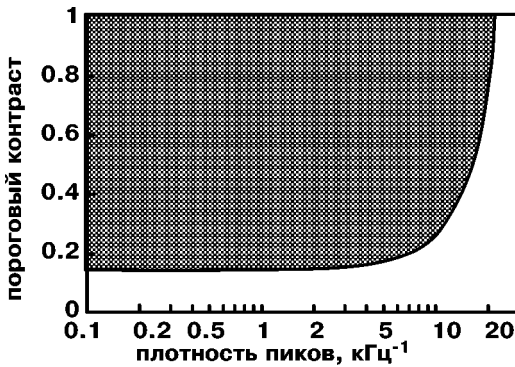


Рис. 5. Кривая контрастной чувствительности нормального слуха человека. Все те сочетания плотности пиков и контраста, которые выше кривой (затененная область), доступны для различения; то, что ниже кривой, — за пределами возможностей слуха.

многое: разработать методы синтеза звуковых сигналов, которые имели бы именно такие частотные спектры, какие нужны для нашей задачи; испробовать разные варианты сигналов, чтобы установить, какие из них наиболее пригодны для тестирования; выяснить, могут ли быть в сигналах посторонние "подсказки", которые исказят результаты измерения; наконец, установить, какова же на самом деле разрешающая способность человеческого слуха в норме. И главное — понять, какие физиологические механизмы определяют разрешающую способность слуха: только ли острота частотной настройки слуховых фильтров или более сложные процессы. Ведь пытаться создать метод диагностики без понимания фундаментальных основ тестируемых процессов — дело бесперспективное.

Все это стало возможным в течение последних лет благодаря выполнению проектов, поддержанных РФФИ. Наконец, впервые были получены данные о частотной разрешающей способности слуха². Если обра-

титься к результатам, их можно свести к нескольким простым графикам, но именно они характеризуют разрешающую способность нормального слуха. Один из них (рис. 5) служит иллюстрацией того, как способность различать контраст между высотой пиков и глубиной провалов зависит от плотности пиков на частотной шкале, т.е. их числа в интервале частот 1 кГц. Если плотность спектральных пиков невелика, человек на слух способен различить спектральный рисунок с отклонениями по громкости от среднего уровня не менее 15–20%; менее контрастные спектральные рисунки слуху недоступны. Но и этот 15–20%-й порог доступен только при низкой плотности спектральной решетки — не более 10 пиков на 1 кГц интервала. По мере того как плотность решетки увеличивается, контрастный порог растет. Например, при плотности решетки 15 пиков на 1 кГц спектральный рисунок будет различим только при контрасте перепадов высоты пиков не меньше 50%. А если плотность решетки увеличить до 20–25 пиков на 1 кГц, то спектральный рисунок даже при 100%-м контрасте едва-едва различим. Дальше увеличивать контраст некуда; стало быть, 20–25 пиков на 1 кГц — это предел частотной разрешающей способности слуха нормального человека. Более подробный спектральный рисунок не различается ни при каких иных параметрах сигнала: все сливается в сплошной, равномерный спектр.

Итак, первый шаг сделан, найдены "рамки", показывающие, в каких пределах слуховая система может различать спектральные рисунки: или контраст не менее 15–20% при низкой плотности спектральных пиков, или плотность не выше 20–25 пиков на 1 кГц при 100%-м контрасте, или некоторые промежуточные сочетания того и другого.

Но сразу возникает новый вопрос: одинакова ли разрешающая способность для разных участков частот-

² Супин А.Я., Попов В.В. // Сенсорные системы. 1997. Т.11. С.5–41; Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B. // Hear. Res. 1994. V.78. P.31–40; Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B. // Hear. Res. 1997. V.108. P.17–27.

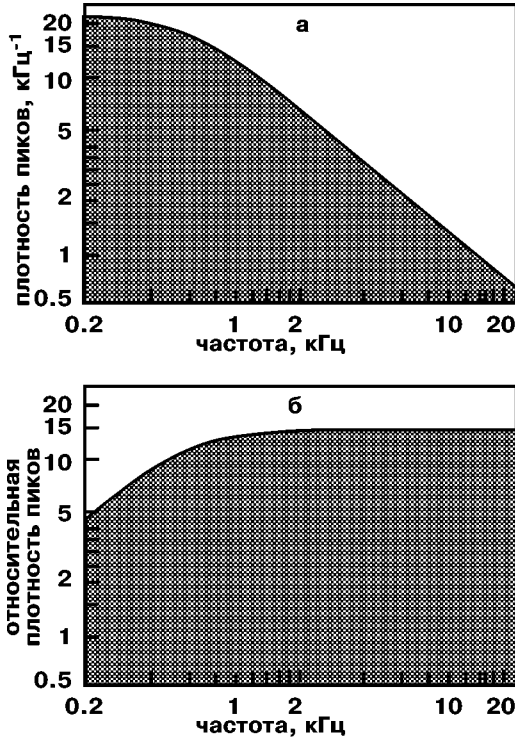


Рис.6. Кривые частотной разрешающей способности слуха, построенные в абсолютной шкале как число пиков на 1кГц частотного интервала (а) и в относительной мере — как отношение средней частоты к интервалу между пиками (б). Области под кривыми (затенены) отвечают различным рисункам спектра; выше — сливающимся в сплошной спектр.

ного диапазона слуха, т.е. для звуков более низкой и более высокой тональности? Предложенный метод вполне позволяет это выяснить. Просто надо использовать сигналы с относительно узкими спектрами, центрированными на разных частотах; тогда полученные с их помощью результаты можно отнести к определенным диапазонам звуковых частот. Например, спектры, показанные на рис.4, сосредоточены вокруг частоты 2 кГц; а можно ведь использовать сигналы с похожими спектрами, но с любой другой центральной частотой — и более низкой, и более высокой. Сделали и это. Оказалось, что найденный предел различения спектральной плотности — 20–25

пиков на 1кГц — доступен лишь в низкочастотной области звуковых колебаний, примерно до 500 Гц. На более высоких частотах различаемая плотность пиков снижается, причем почти обратно пропорционально частоте (рис.6,а). Раз так, имеет смысл представить плотность спектральной “решетки” не в абсолютной мере (как число пиков на 1кГц частотного интервала), а в относительной — как отношение средней частоты к интервалу между пиками. В таком виде разрешающая способность оказывается почти постоянной в широком диапазоне частот (рис.6,б) и составляет 11–14 относительных единиц. Таким образом, нормальный слух различает спектральные рисунки, в которых интервал между соседними пиками не меньше 1/11–1/14 (7–9%) от средней частоты.

Но измерить остроту слуха — это полдела. Нужно понять, что именно определяет и ограничивает остроту слуха. Многое проясняется, если сравнить частотную разрешающую способность с данными об остроте частотной настройки, которые были получены традиционными методами. Посчитать, как частотные фильтры с определенной настройкой пропускают спектры любой формы, — не слишком сложная математическая задача; острота частотной настройки тоже известна из опытов с маскировкой. Посчитали и получили очень и очень примечательный результат (рис.7): реальная разрешающая способность слуха, полученная в прямых экспериментах, оказалась примерно вдвое выше расчетной! Значит, не напрасны были сомнения, только ли острота частотной настройки отвечает за способность к различению сложных звуковых сигналов. Стало ясно, что важнейшую роль играют нейрофизиологические процессы, приводящие к обострению частотной избирательности. Впрочем, для нейрофизиологов это не слишком большая неожиданность: взаимодействия между нейронами, приводящие к подчеркиванию, выделению контрастов в

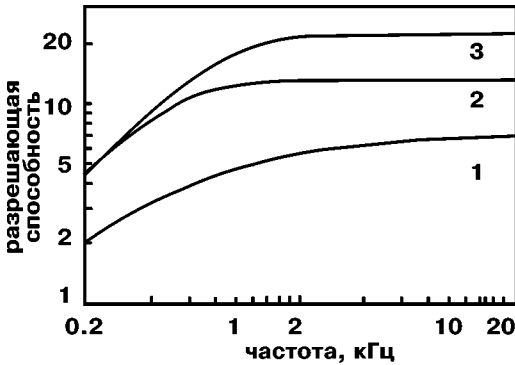


Рис. 7. Частотная разрешающая способность слуха. Расчетная кривая (1) проходит примерно вдвое ниже кривой реальной разрешающей способности (2). Если же спектр сигнала имеет крутые края, то разрешающая способность — еще выше (3).

сложных сигналах, хорошо известны в нервной системе. Но важно было узнать, в какой именно мере эти процессы ответственны за обеспечение остроты слуха. Что и сделано.

Но появляются все новые и новые вопросы. Например, одинакова ли разрешающая способность слуха при разных формах звукового сигнала? Тут тоже обнаружили любопытные детали. Если звуковой сигнал набран не из гладких пиков, а с резко очерченными краями, то разрешающая способность оказывается еще раза в полтора выше (эти результаты тоже показаны на рис. 7). Соответственно разница между тем, что предсказывает острота частотной настройки, и тем, что есть на самом деле, оказывается уже почти трехкратной. Этот фактор тоже в существенной мере определяет остроту слуха.

В целом нам понятно уже довольно многое, но не менее того предстоит еще выяснить.

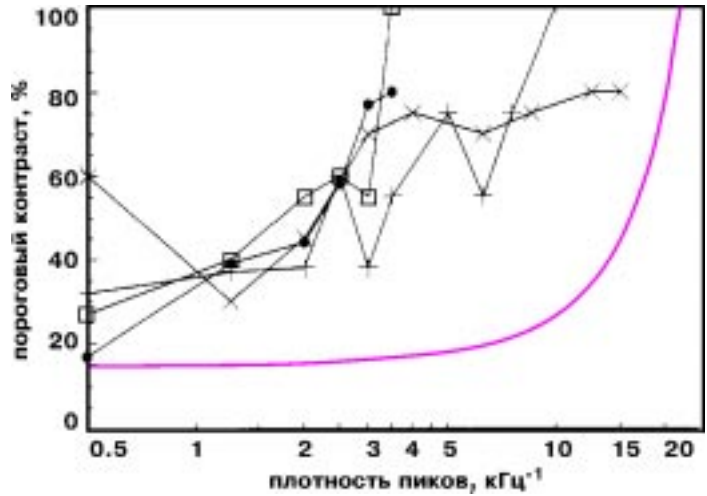
Во-первых, сложный звуковой сигнал — это не только определенный спектр, но и определенная динамика изменения этого спектра во времени, т.е. это спектрально-временной образ. Значит, на следующем этапе необходимо исследовать способность к различению меняющихся

во времени спектров и установить, как взаимосвязаны способности различать спектральную и временную структуру сигналов.

Во-вторых, уже ясно: способность различать спектральный рисунок зависит еще от того, насколько он обогащен составляющими в соседних участках спектра. Фактически эта способность зависит от всей структуры сигнала целиком. Значит, надо исследовать разрешающую способность слуха при разных формах сложных сигналов и проследить воздействие соседних участков спектра на нейрофизиологический отклик.

В-третьих... В-четвертых... Нет смысла делать этот список слишком длинным: все равно на каждом этапе исследований появятся новые вопросы. Но если впереди столь широкое поле для фундаментальных исследований, значит ли это, что возможность практического применения метода маячит лишь далеко на горизонте? Вовсе нет. Уже сейчас можно заняться тем, чтобы применить полученные результаты в диагностических целях, чтобы знать, насколько у того или иного пациента нарушена способность к различению сложных звуковых сигналов, и придать исследованию потери слуха объективную оценку. Относительно самой процедуры измерения сомнений нет: она предельно проста, и не видно никаких препятствий для ее использования в практике. Другой вопрос — насколько показательны получаемые результаты для диагностики? Это предмет особого исследования с участием медиков, хотя некоторые шаги уже сделаны. В свое время нашими работами заинтересовалась авторитетный аудиолог и большой энтузиаст новых идей Л.А.Новикова. Она измерила разрешающую способность у нескольких пациентов с дефектами слуха и получила весьма впечатляющие результаты. Они показаны на рис. 8. Хотя полученные контрастные кривые основательно "разбредаются" (ведь у каждого пациен-

Рис. 8. Кривые контрастной чувствительности слуха, полученные при обследовании нескольких пациентов с дефектами слуха. Цветом выделена кривая, соответствующая нормальному слуху.



та своя степень потери слуха), общее у них одно: все они проходят намного выше, чем кривая, соответствующая нормальному слуху. Это означает, что у всех пациентов пострадали не только чувствительность слу-

ха (что подтверждали и данные традиционной аудиометрии), но и его разрешающая способность. Так что уже сейчас, когда исследования еще не закончены, есть предмет для разговора с аудиологами-практиками.