АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2004, том 50, № 3, с. 419–428

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.76

БИНАУРАЛЬНОЕ ДЕМАСКИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ В ОГИБАЮЩЕЙ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

© 2004 г. В. Н. Телепнев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: telepnev@akin.ru

Поступила в редакцию 12.10.03 г.

Исследовалось бинауральное демаскирование тональной компоненты в шумовой амплитудно-временно́й огибающей высокочастотных сигналов, представляющих собой синусоидальную несущую частотой 2000–5000 Гц, модулированную по амплитуде низкочастотным сигналом. В качестве модулирующей функции использовалась смесь тона (интераурально синфазно или противофазно) частотой 300 Гц и диотического маскирующего шума в полосе частот от 0 до 400 Гц, подвергнутая однополупериодному линейному детектированию (выпрямлению). Испытуемый обнаруживал ритмическую компоненту в шумовой модулирующей функции. Показано, что в этих условиях бинауральная разность уровней маскировки растет с ростом частоты несущей, достигая 25 дБ, и резко снижается при маскировке низкочастотного диапазона базилярной мембраны в окрестности частоты 300 Гц. Латерализация по интерауральной фазе тональной 100% амплитудной модуляции частотой 300 Гц при частоте несущей 2000–5000 Гц также резко снижается (в наших экспериментах) при маскировке низкочастотного диапазона базилярной мембраны.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что порог (уровень) маскировки максимален при одинаковых интерауральных фазовых различиях тонального сигнала и маскера. Если интерауральная разность фаз тона изменяется, то порог маскировки понижается. Это позволяет говорить о бинауральном демаскировании, которое характеризуется разностью уровней маскировки интераурально синфазного и противофазного тонов в интераурально когерентном шуме, или бинауральной разностью уровней маскировки (БРУМ). БРУМ низкочастотных (НЧ) тонов (ниже 500 Гц) широкополосным шумом достигает 15 дБ. БРУМ высокочастотных (ВЧ) тонов (выше 2000 Гц) не превышает 3 дБ [1]. БРУМ сложных сигналов исчезает, если они не содержат низких частот. Это объясняется тем, что воспроизведение временно́й формы сигнала в плотности импульсации группы нейронов слухового нерва возможно только для НЧ-сигналов. ВЧ-сигналы сохраняют в слуховом нерве только НЧ-огибающую звука.

Однако при маскировке узкополосным шумом бинауральное демаскирование имеет место и для высокочастотных тонов [2–4]. Дело в том, что узкополосный гауссовский шум имеет глубокую низкочастотную огибающую, которая изменяется при добавлении тона к шумовому маскеру и зависит от временны́х сдвигов тона, так что добавление интераурально противофазного тона приводит к интерауральной декорреляции НЧ-огибающих и облегчает обнаружение интераурально противофазного тона. Вначале казалось, что БРУМ ВЧ-тонов в этих условиях тоже достигает 15 дБ. Однако дальнейшие эксперименты показали, что она растет с ростом пик-фактора (отношения усредненных максимальных значений к среднему огибающей) [5–7], но не превышает 8–10 дБ в традиционных экспериментальных условиях.

В работах [8–12] сообщалось о явлении бинаурального демаскирования периодических компонент амплитудной огибающей высокочастотных сигналов, представляющих собой синусоидальную несущую в диапазоне частот от 2000 до 5000 Гц, модулированную по амплитуде (АМ) низкочастотной смесью тонального сигнала и маскера. Показано, что в этих условиях БРУМ может достигать 30 дБ. Данная статья содержит обзор этих работ, а также результаты последних экспериментальных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И СИГНАЛЫ

Мы намеревались провести эксперименты с такими высокочастотными сигналами, которые сохраняют информацию о фазе при рецепции. Мы полагали, что эксперименты с амплитудно-модулированными сигналами могут быть инте-

ресными, поскольку глубина модуляции в данном случае может контролироваться экспериментатором. Предполагалось также провести весь объем исследований с одними и теми же слушателями, пусть и с небольшой группой. Испытуемый обнаруживал интераурально синфазную или противофазную ритмическую (тональную) компоненту в интераурально когерентной узкополосной шумовой огибающей амплитудно-модулированного сигнала. В качестве модулирующей функции использовалась смесь тона (интераурально синфазно или противофазно) частотой 100–300 Гц и маскирующего шума (интераурально синфазно) в полосе частот от 0 до 400 Гц. Эти экспериментальные условия мы в дальнейшем называем условиями *линейной АМ*.

В 1998–2000 г. нами были найдены новые экспериментальные условия бинаурального демаскирования ВЧ-сигналов. В этих экспериментах амплитудная огибающая высокочастотной тональной несущей формировалась таким образом, чтобы она повторяла форму рецепторного потенциала и постстимульной гистограммы НЧ-нейронов, если бы стимуляция осуществлялась непосредственно НЧ-колебанием, использованным в эксперименте в качестве огибающей. Для этого в качестве модулирующей функции использовалась низкочастотная смесь сигнала (тон частотой 300 Гц) и шумового маскера, подвергнутая линейному однополупериодному детектированию (выпрямлению). В качестве модулятора использовался перемножитель. Можно предполагать, что в этих экспериментальных условиях (условия *однополупериодной АМ*) рецепторный потенциал и постстимульная гистограмма ВЧ-нейронов (с характеристическими частотами вблизи частоты несущей 3000 Гц) в данных экспериментах и НЧ-нейронов с характеристическими частотами вблизи частоты 300 Гц в экспериментах, демонстрирующих бинауральное демаскирование тона частотой 300 Гц в низкочастотном шуме, качественно были одинаковы.

На рис. 1 приведены примеры реализаций экспериментальных сигналов. Периодическая составляющая (300 Гц) в огибающей здесь достаточно велика и ярко выражена: отчетливо видно пять периодов. На рис. 1а, 1б изображено амплитудно-модулированное колебание и его спектр, на рис. 1в, 1г – то же с предварительным однополупериодным выпрямлением модулирующей функции.

Для контроля и сравнения мы проводили оценки БРУМ также и в традиционных экспериментальных условиях при маскировке широкополосным и узкополосным шумом.

МЕТОДИКА

Генерация сигналов осуществлялась компьютерной программой посредством звуковой карты SB-16 при частоте квантования 44100 Гц. Эта же программа обрабатывала ответы испытуемого и управляла экспериментом.

Испытательная последовательность состояла из двух или из четырех сигналов. В последнем случае первый и четвертый сигналы содержали только маскер. Испытуемый должен был решить, в каком из двух (во втором или в третьем) сигналах к маскеру добавлен тон. Пауза между сигналами в испытательной последовательности в разных опытах составляла от 0.7 до 1.0 с; длительность маскера – 0.5 с; тональный сигнал на 20 мс короче и центрирован относительно маскера. Время линейного нарастания и спада как маскера, так и сигнала составляло 5 мс.

Для оценки порогов маскировки использовалась адаптивная методика двухальтернативного вынужденного выбора по схеме: после каждой ошибки сигнал увеличивался на один шаг, после двух подряд правильных ответов – на шаг уменьшался. Эти изменения сигнала в условиях *линейной* АМ и *однополупериодной АМ* производились в модулирующей функции. Реализация маскера в процессе одной оценки БРУМ не изменялась. В начале эксперимента амплитуда сигнала выбиралась такой, чтобы сигнал наверняка обнаруживался, а шаг составлял 30% от текущей амплитуды. Каждый раз, когда текущее среднее квадратическое отклонение точек поворота становилось меньше одного шага, шаг уменьшался вдвое, впрочем он никогда не был меньше 7.5%.

Первые две точки поворота игнорировались. В качестве порога обнаружения в первой половине работы принималось среднее шестнадцати точек поворота. При этом стандартное отклонение оценки порога в одном эксперименте, оцениваемое по точкам поворота, оказывалось, как правило, меньше 1 дБ, однако отличия оценок в повторных экспериментах могли превышать 10 дБ, что обычно для психоакустики. Кроме того, сравнение оценок порогов по 8 и 16 точкам поворота показало, что в последнем случае пороги даже несколько выше (видимо, из-за утомляемости испытуемого), а их разброс не меньше, чем в первом. Оценки порогов во второй половине работы выполнялись по восьми точкам поворота.

В ходе одного эксперимента сначала по восьми точкам поворота выполнялась оценка уровня маскировки интераурально синфазного (противофазного) тона с использованием одной и той же запомненной реализации шумового маскера. Затем испытуемый, не выходя из акустической кабины, выполнял по восьми точкам поворота оценку уровня маскировки интераурально проти-

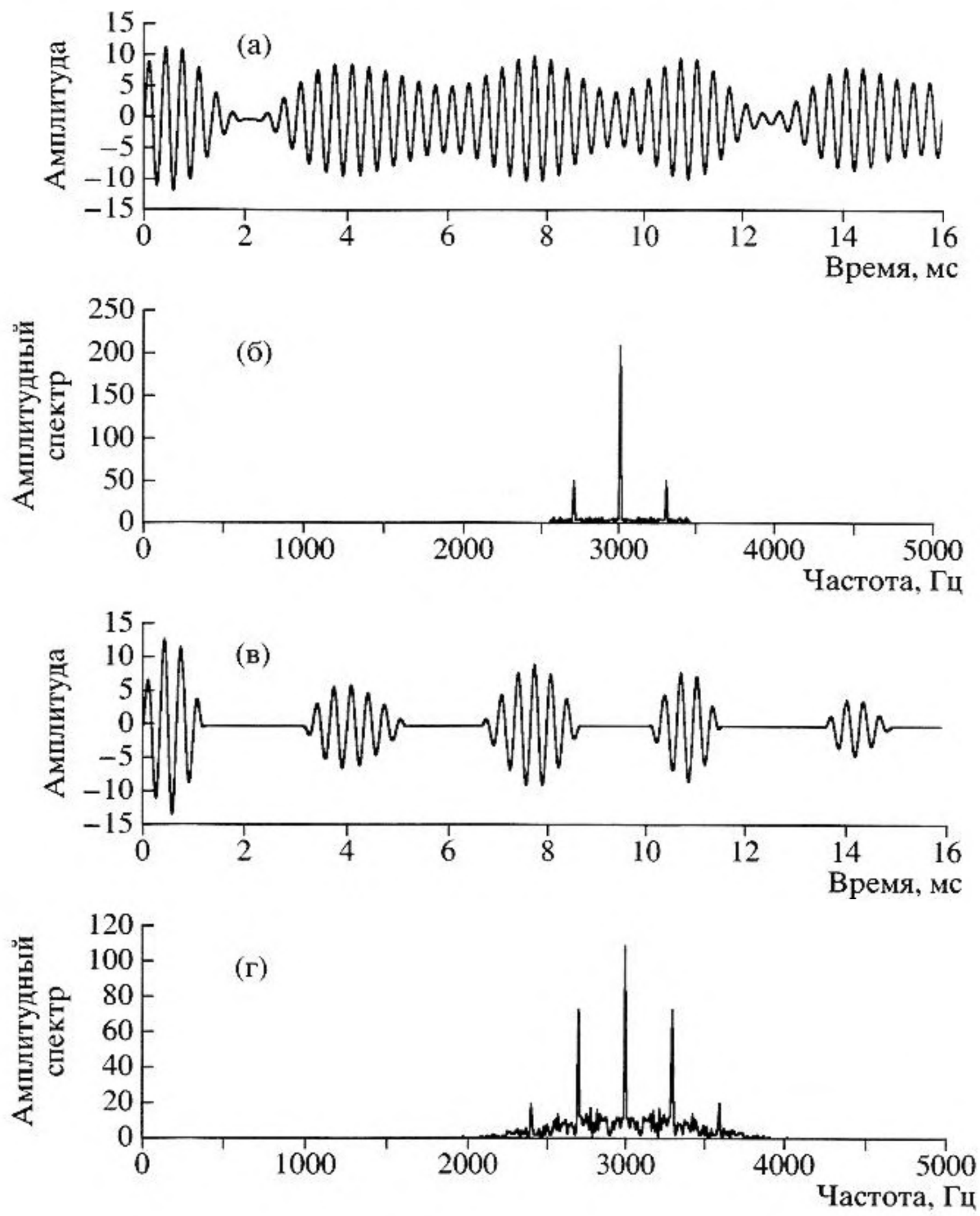

Рис. 1. Временны́е реализации сигналов и их спектры. а, б – экспериментальные условия *линейной АМ*: а – временна́я реализация, б – спектр; в, г – условия *однополупериодной АМ*: в – временна́я реализация, г – спектр.

вофазного (синфазного) тона с использованием той же самой реализации шумового маскера. Таким образом, для одной оценки БРУМ использовалась одна реализация маскера. Начальная фаза тонального сигнала в каждом испытании выбиралась случайно в соответствии с равномерным распределением на интервале от 0 до 2π. Таким образом, фазово-временны́е соотношения сигнала и маскера были рандомизированы.

В качестве маскера использовались интерауурально синфазные шумы, образованные одним из двух способов: в первом случае – посредством фильтрации (программно) последовательности от датчика случайных чисел низкочастотным или полосным фильтром второго порядка, во втором – суммой 50–100 синусоид с релеевским распределением амплитуд и равномерным распределением фаз, что является моделью нормального шума.

Адаптивная методика двухальтернативного вынужденного выбора использовалась и для оценки порога латерализации по фазовым интерауральным различиям тональной модулирующей функции при 100%-ной амплитудной модуляции. Два сигнала тестовой последовательности получали равные по величине и противоположные по знаку интерауральные фазовые сдвиги синусоидальной амплитудной огибающей, один из которых соответствовал сдвигу слухового образа вправо, а другой – влево. Испытуемый должен был решить, какой из сигналов (первый или второй) сдвинут вправо. После каждой ошибки текущая интерауральная задержка (фаза) огибающих увеличивалась на 30%, после двух подряд правильных ответов уменьшалась на 30%.

Адаптивная методика не всегда приводит к успеху, если порог латерализации оценивается при действии помех. Для таких экспериментальных

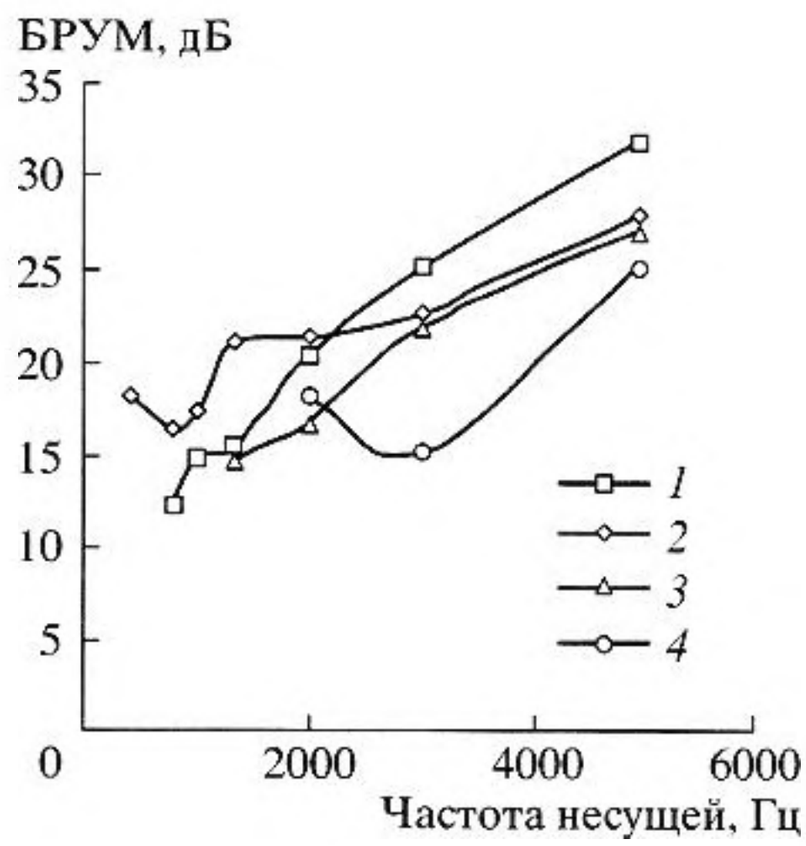

Рис. 2. Зависимость БРУМ в условиях *однополупериодной АМ* от частоты несущей (испытуемый ТВН). Каждая точка – среднее по пяти экспериментам. УЗД 80–85 дБ. Параметр кривых – частота тона в модулирующей функции: *1* – 70 Гц; *2* – 120 Гц; *3* – 200 Гц; *4* – 300 Гц.

условий использовалась статистическая методика. В этом случае шаг по фазе 100% амплитудной модуляции соответствовал задержке в 80 мкс. Диапазон фазовых сдвигов состоял из десяти значений, соответствующих задержкам от 80 до 800 мкс. Один из сигналов экспериментальной последовательности получал фазовый сдвиг, соответствующий латерализации вправо, другой сигнал получал такой же по величине фазовый сдвиг, соответствующий латерализации влево. Фазовые сдвиги выбирались компьютерной программой в случайном порядке, но таким образом, чтобы в десяти испытаниях были использованы все десять возможных значений от 80 до 800 мкс. В каждом испытании испытуемый сообщал, какой из сигналов (первый или второй) слышится правее. Цикл из десяти испытаний повторялся 10 раз, так что для одной оценки порога латерализации выполнялось 100 испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вначале мы повторили экспериментальные оценки БРУМ НЧ и ВЧ-тонов, известные из литературы [1, 2]. В них участвовали трое испытуемых с нормальным слухом в возрасте от 40 до 60 лет. В этих экспериментах [8–10] средние значения БРУМ тона частотой 3000 Гц при маскировке узкополосными шумами не превышали 5–10 дБ у трех испытуемых.

Чтобы получить дополнительные сведения о роли интерауральной декорреляции амплитудных НЧ-огибающих, мы провели оценки БРУМ при обнаружении синусоидальной компоненты частотой 300 Гц в НЧ-шуме с полосой частот от 0 до 400 Гц, модулирующем ВЧ-несущую: испытуемый обнаруживал ритмическую компоненту в шумовой модулирующей функции. В условиях *линейной* АМ при частоте несущей 3000 Гц БРУМ оказалась примерно такой же, как БРУМ тона той же частоты в узкополосном маскере.

В условиях *однополупериодной АМ* БРУМ резко возрастает. При этом все испытуемые отмечали, что слуховой образ в случае интерауурально противофазных сигналов кроме центральной содержит ярко выраженную правую и левую части. И именно этот субъективный признак понижает порог обнаружения противофазного тона в огибающей *однополупериодной АМ*. Это свойство, но в очень малой степени, присутствует и в условиях линейной АМ, а также в традиционных условиях обнаружения интерауурально противофазного тона в узкополосном высокочастотном шуме.

Полученные данные демонстрируют рост бинаурального демаскирования при возрастании частоты несущей и, по-видимому, указывают на связь этого явления с одновременным ростом ширины критической полосы. Согласно экспериментальным оценкам [8–10] на частотах несущей 3000, 4000 и 5000 Гц БРУМ составляла 13, 20 и 24 дБ соответственно при частоте обнаруживаемого сигнала 300 Гц.

На рис. 2 приведены для испытуемого ТВН зависимости БРУМ в условиях *однополупериодной АМ* от частоты обнаруживаемого тонального сигнала в модулирующей функции и частоты несущей. Маскер в модулирующей функции представлял собой имитацию нормального шума из 100 тонов с шагом по частоте 1 Гц.

Можно предположить, что БРУМ достигает максимальных значений, когда огибающая АМ-колебания проходит фильтр базилярной мембраны без искажений. В этом случае рецепторный потенциал и постстимульная гистограмма ВЧ-нейронов с характеристическими частотами вблизи частоты несущей в данных экспериментах, видимо, совпадают с рецепторным потенциалом и постстимульной гистограммой НЧ-нейронов, имеющих характеристические частоты вблизи частоты обнаруживаемого тона (70, 120, 200 или 300 Гц) в традиционных экспериментах по обнаружению НЧ-тона в узкополосном шуме. При выполнении этого условия рецепторный потенциал и постстимульная гистограмма имеют максимально возможный пик-фактор. Для сохранения формы огибающей после прохождения АМ-сигналом фильтра базилярной мембраны нужно, чтобы ширина критической полосы на частоте несущей превышала ширину спектра АМ-сигнала, которая в условиях *однополупериодной АМ* в 3–4 раза больше чем в условиях линейной АМ (рис. 1). Например, при частоте моду-

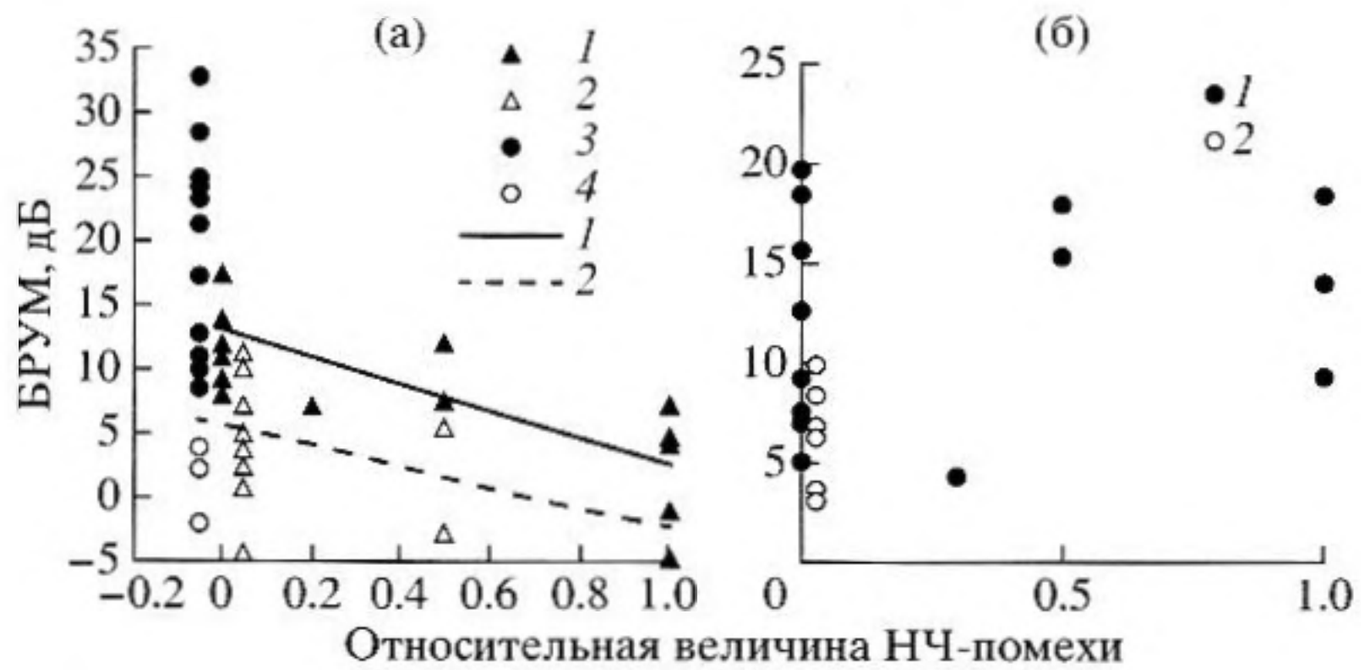

Рис. 3. БРУМ в амплитудной огибающей в условиях *линейной АМ* и *однополупериодной АМ* для двух испытуемых УЗД 70–80 дБ. Относительная величина НЧ-помехи равна отношению ее среднеквадратического значения к среднеквадратическому значению модулирующего маскера. Черные точки – условия *однополупериодной АМ*, светлые точки – условия *линейной АМ*. а – испытуемый ТВН: *1* – условия *однополупериодной АМ* (17 точек), частота несущей 3000 Гц, линия тренда сплошная; *2* – условия *линейной АМ* (14 точек), частота несущей 3000 Гц, линия тренда штриховая; *3* – условия *однополупериодной АМ* (12 точек), частота несущей 5000 Гц; *4* – условия *линейной АМ* (3 точки), частота несущей 5000 Гц; точки, расположенные вблизи оси ординат, смещены, чтобы разделить их визуально; на самом деле они располагаются на оси ординат, то есть все они соответствуют отсутствию НЧ-помехи (только на этом рисунке). б – испытуемый ТМВ: *1* – условия *однополупериодной АМ* (14 точек), частота несущей 3000 Гц; *2* – условия *линейной АМ* (6 точек), частота несущей 3000 Гц.

ляции 120 Гц ширина критической полосы должна быть 800–1000 Гц. Следовательно, можно ожидать рост БРУМ при повышении несущей частоты до 4000–5000 Гц. Аналогично в условиях *однополупериодной АМ* БРУМ снижалась до 12 дБ и не зависела от частоты несущей, если модулирующая функция после линейного детектора перед модуляцией проходила через фильтр нижних частот второго порядка с граничной частотой 400 Гц и с затуханием 12 дБ на октаву вдали от граничной частоты.

Другая гипотеза состоит в том, что из-за нелинейности базилярной мембраны во внутреннем ухе возникают низкочастотные механические колебания, соответствующие амплитудно-временно́й огибающей ВЧ-сигнала. Эти колебания возбуждают низкочастотную часть базилярной мембраны, и именно здесь происходит обнаружение низкочастотной синусоидальной компоненты, содержащейся в огибающей ВЧ-сигнала, и, как следствие, в условиях однополупериодной АМ наблюдается БРУМ, свойственная НЧ-сигналам. Для проверки этого предположения с теми же самыми испытуемыми были повторно проведены описанные выше эксперименты, но теперь низкочастотная область базилярной мембраны маскировалась независимым НЧ-шумом, занимающим тот же спектральный диапазон, что и модулирующий маскер. У одного из испытуемых в диапазоне УЗД 70–80 дБ без маскировки НЧ-диапазона БРУМ превысила 15 дБ, при маскировке НЧ-диапазона БРУМ менее 4 дБ. БРУМ второго испытуемого при маскировке НЧ-диапазона также уменьшается, хотя и в меньшей степени. На рис. 3 представлены оценки БРУМ в экспериментальных условиях *линейной АМ* и *однополупериодной АМ*.

Одновременно с теми же испытуемыми проводились измерения латерализации тональных сигналов частотой 3000 Гц по интерауральным амплитудным отличиям и по интерауральным фазовым отличиям амплитудной огибающей (синусоидальная 100%-ная амплитудная модуляция частотой 300 Гц) при одновременной маскировке НЧ-шумом низкочастотного диапазона базилярной мембраны. Измерения выполнялись как по адаптивной методике двухальтернативного вынужденного выбора, так и по статистической методике. Величина НЧ-помехи оценивалась, как отношение ее среднеквадратического значения к среднеквадратическому значению несущей.

Краткая сводка результатов:

– Измерения пороговых значений интерауральной задержки (пересчитанной по интерауральной разности фаз) амплитудной огибающей выполнялись в диапазоне УЗД 70–80 дБ.

– Как видно из рис. 4–5, пороги латерализации по фазовым интерауральным отличиям амплитудной огибающей в наших измерениях оказались в той или иной мере зависимыми от маскировки НЧ-диапазона у обоих испытуемых.

Без маскировки НЧ-диапазона базилярной мембраны у двух испытуемых они составляют 200–700 мкс.

При маскировке НЧ-диапазона шумом со спектральной плотностью от 40 до 60 дБ латерализация, как правило, невозможна, или пороговая интерауральная задержка больше 1000 мкс

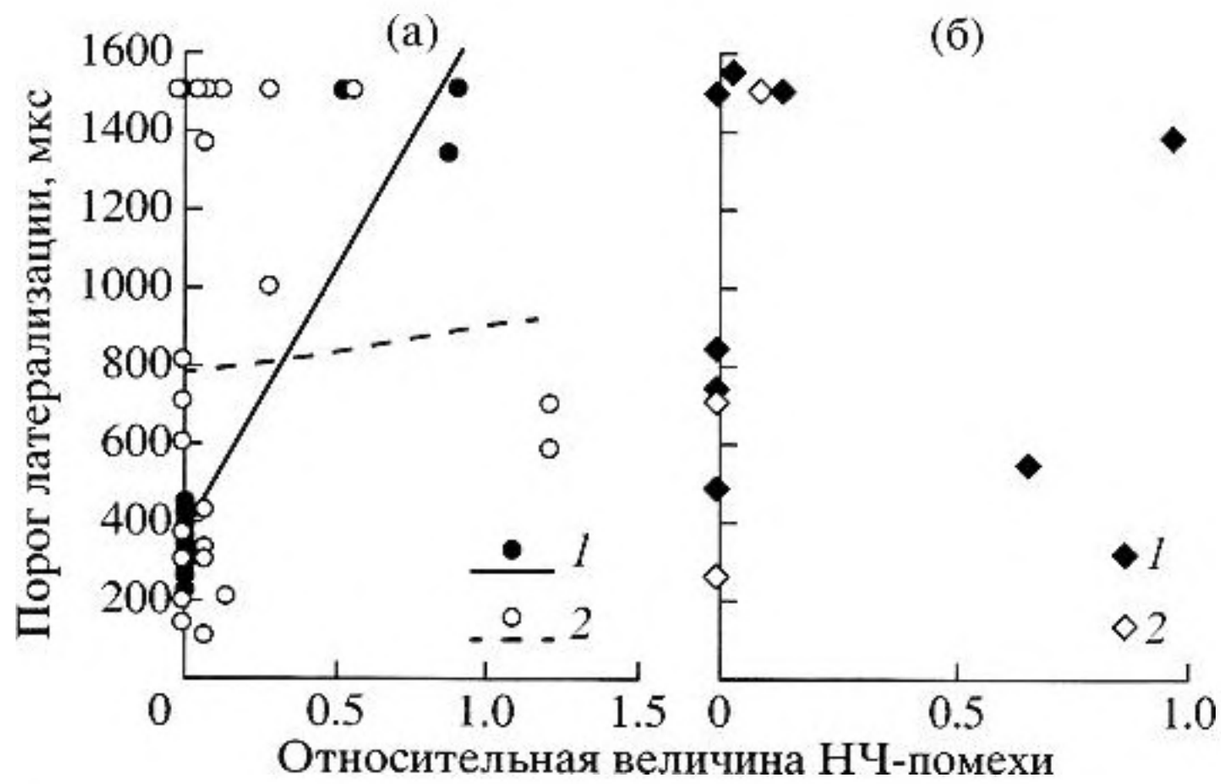

Рис. 4. Влияние НЧ-помехи на латерализацию по фазовым интерауральным различиям амплитудно-временнóй огибающей 100% АМ для двух испытуемых. УЗД несущей 70–80 дБ. Относительная величина помехи равна отношению ее среднеквадратического значения к среднеквадратическому значению несущей. а – испытуемый ТВН, адаптивный метод вынужденного выбора: *1* – 1998 год (16 точек), линия тренда сплошная; *2* – 1999 год (24 точки), линия тренда штриховая. б – испытуемый ТМВ: *1* – адаптивный метод вынужденного выбора (8 точек); *2* – статистический метод (3 точки).

(измеримое максимальное значение интерауральной задержки, составляющее полпериода частоты АМ, равно 1666 мкс).

– Результаты подвержены заметному разбросу, в частности, под влиянием изменений состояния внимания испытуемого.

Рис. 5. Влияние НЧ- помехи на латерализацию по фазовым интерауральным различиям в 100% амплитудной модуляции (испытуемый ТВН, статистическая методика). УЗД несущей 80 дБ. Относительная величина помехи равна отношению ее среднеквадратического значения к среднеквадратическому значению несущей. *1* – без помехи (каждая точка – 60 испытаний); *2* – относительная величина помехи 0.1 (каждая точка – 40 испытаний).

– Пороги латерализации по амплитудным интерауральным отличиям у обоих испытуемых не зависели от маскировки НЧ-диапазона базилярной мембраны.

Чтобы убедиться, что полученные результаты не сводятся к простой маскировке частотного диапазона 3000–5000 Гц низкочастотным шумом, расположенным в частотном диапазоне 250–350 Гц, достаточно рассмотреть представленные на рис. 6 зависимости маскировки в условиях однополупериодной АМ при частоте несущей 5000 Гц от амплитуды и средней частоты второго узкополосного маскера. Напомним, что обнаружение синусоидальной компоненты частотой 300 Гц в шумовой модулирующей функции осуществлялось при действии двух независимых маскеров: одного – в модулирующей функции, второго – маскирующего заданный частотный диапазон на базилярной мембране. Каждый из этих маскеров представлял собой имитацию нормального шума из 100 тонов с шагом в 1 Гц. Относительная величина второго маскера в этих контрольных опытах принимала лишь два значения – 0 и 0.3. Из рисунка видно, что маскировка интерауурально синфазной периодической компоненты в амплитудной модуляции вторым маскером отсутствует или пренебрежимо мала по сравнению с маскировкой модулирующим шумом в условиях *однополупериодной АМ*, так как пороги обнаружения практически не зависят от амплитуды и частотного положения второго маскера.

Пороги обнаружения интерауурально противофазной периодической компоненты в модулирующей функции, напротив, сильно зависят от второго маскера, причем маскировка максимальна при средней частоте второго маскера 300 Гц и

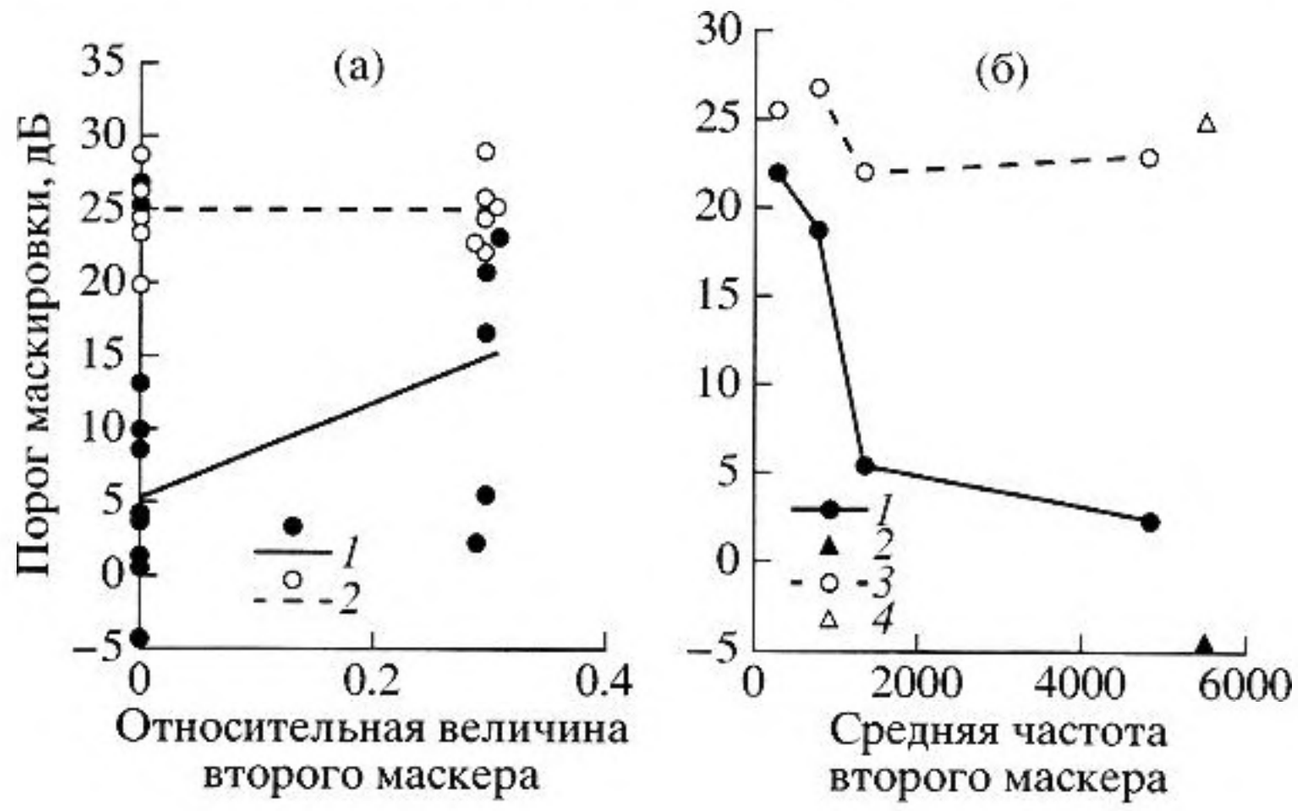

Рис. 6. Зависимость порогов обнаружения синусоидальной компоненты (300 Гц) в шумовой модулирующей функции в условиях *однополупериодной АМ* при частоте несущей 5000 Гц от амплитуды и средней частоты второго узкополосного (100 Гц) маскера (испытуемый ТВН). УЗД 80 дБ. Относительная величина второго маскера равна отношению его среднеквадратического значения к среднеквадратическому значению модулирующего маскера. а – зависимость от амплитуды второго маскера при его средней частоте 300 Гц: *1* – сигнал противофазно, линия тренда сплошная; *2* – сигнал синфазно, линия тренда штриховая. б – зависимость от средней частоты второго маскера при его относительной амплитуде 0.3: *1* – сигнал противофазно; *2* – противофазно, без маскировки; *3* – сигнал синфазно; *4* – синфазно, без маскировки.

практически отсутствует (находится в пределах разброса данных), если средняя частота второго маскера находится в области 5000 Гц. Можно заподозрить, что это объясняется завалом амплитудно-частотной характеристики головных телефонов на высоких частотах, благодаря чему маскировка частотной области вблизи 5000 Гц полосным шумом из окрестности 300 Гц эффективнее, чем из окрестности 5000 Гц. Чтобы исключить такую возможность, у того же испытуемого были измерены на интересующих нас частотах абсолютные слуховые пороги и пороги маскировки тона тоном частоты 300 Гц в традиционной постановке, приведенные на рис. 7. Для сравнения здесь же показаны средние слуховые пороги по Цвикеру и Фельдкеллеру [14]. Как видно на рисунке, на частотах 3000 и 5000 Гц у испытуемого имеются заметные слуховые потери, а маскировка тоном 300 Гц на этих частотах практически отсутствует.

Учитывая, что в экспериментальных условиях *однополупериодной АМ* нелинейное преобразование однополупериодного детектирования приводит к расширению спектра модулированного сигнала, были проведены экспериментальные исследования зависимости БРУМ от ширины полосы спектра маскера и обнаруживаемого сигнала в традиционных экспериментальных условиях [11, 12]. Полученные данные позволяют заключить, что в экспериментах с простым увеличением ширины полосы, например, при обнаружении гармонического ряда 2100, 2400, 2700, 3000, 3300, 3600, 3900 Гц в шуме со спектром в диапазоне 1800–4100 Гц БРУМ не превышает 4 дБ так же, как и при обнаружении тона 3000 Гц в широкополосном шуме. Подобный результат был получен и ранее [13].

В то же время при обнаружении гармонического ряда 2100, 2700, 3300, 3900 Гц на фоне маске-

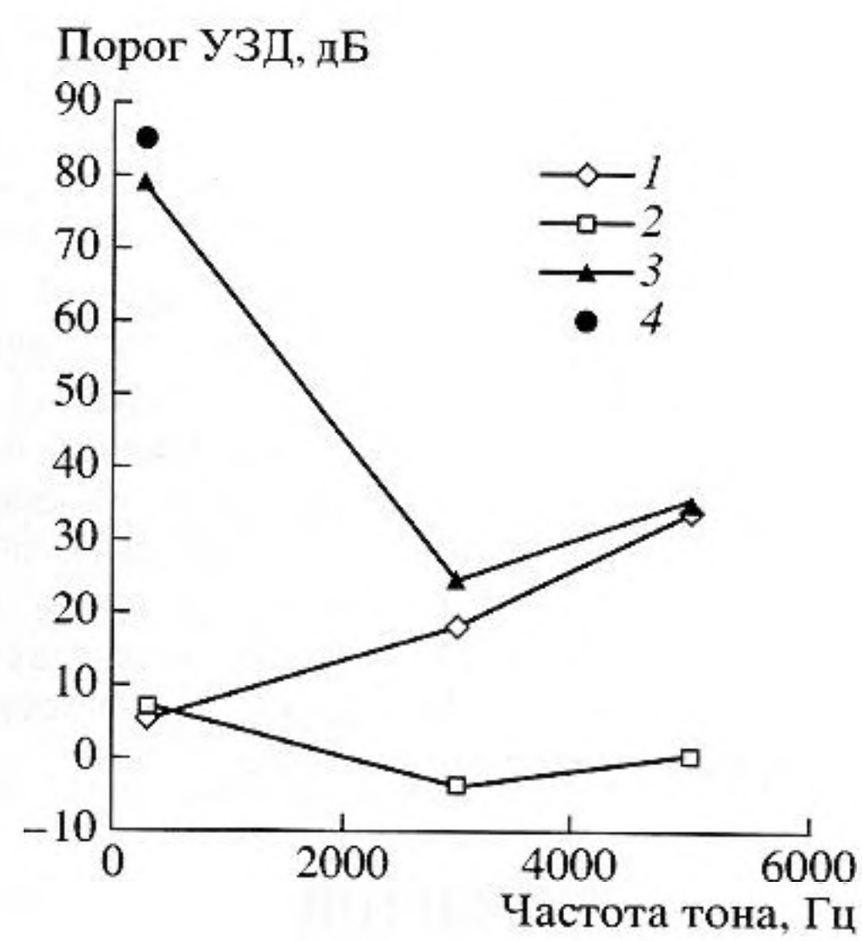

Рис. 7. Абсолютные слуховые пороги и пороги маскировки тона тоном (испытуемый ТВН). *1* – абсолютные пороги испытуемого ТВН; *2* – абсолютные пороги по Цвикеру и Фельдкеллеру; *3* – пороги маскировки тоном 300 Гц испытуемого ТВН; *4* – УЗД и частота тонального маскера (85 дБ, 300 Гц).

Рис. 8. Временна́я реализация и спектр широкополосного сигнала. Штриховыми вертикальными линиями отмечено частотное положение отсутствующих в спектре широкополосного сигнала тональных компонент полигармонической несущей (2400, 2800, 3200, 3600 Гц), осуществляющей многократное гетеродинирование маскера. Сплошные вертикальные линии – тональные компоненты обнаруживаемого полигармонического сигнала.

ра, который представляет собой сумму шумового сигнала со спектром в диапазоне 1800–2400 Гц и трех шумовых сигналов, полученных посредством гетеродинирования первого маскера вверх на 600, 1200 и 1800 Гц, БРУМ возрастает примерно до 8 дБ.

Также в традиционных экспериментальных условиях был проведен эксперимент с маскером, образованным посредством многократного гетеродинирования аналогично предыдущему, но со спектральным перекрытием гетеродинированных частей маскера. Подобное перекрытие происходит при расширении спектра помехи в экспериментальных условиях *однополупериодной АМ* (рис. 1). Конфигурация, показанная на рис. 8, создана посредством гетеродинирования полосного шума из диапазона 200–400 Гц с помощью полигармонической несущей. Огибающая временно́й реализации маскера имеет высокий пик-фактор, но и в этом случае БРУМ полигармонического сигнала возросла примерно до 8 дБ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты работы находятся в качественном согласии с некоторыми известными фактами. Полученные значения БРУМ тона 3000 Гц в узкополосном шуме не сильно превосходят данные, характерные для ВЧ-тонов в широкополосном маскере. Они несколько ниже данных работы [2], но находится в приемлемом соотношении с результатами более поздних публикаций [5–7].

Большие значения БРУМ в условиях *однополупериодной АМ*, видимо, связаны с большим пик-фактором огибающей: в этих условиях при обнаружении интераурально противофазной модуляции значительно усиливается субъективный признак распада слухового образа на центральную и боковые части. Это соответствует роли нормированной корреляции, на которую обращают внимание авторы работ [2–5], так как нормированная корреляция зависит (в отличие от чаще употребляемого коэффициента корреляции) от пик-фактора. В работах [6, 7] также приводятся данные, демонстрирующие рост БРУМ высокочастотных тонов с ростом флюктуаций огибающей узкополосного маскера в традиционных экспериментальных условиях. Авторы сравнивали пороги обнаружения ВЧ-тонов при маскировке слабо флюктуирующим ("low-noise" noise) и сильно флюктуирующим (Gaussian noise, "high-noise" noise) шумом. Но и в последнем случае БРУМ не превышала 8–10 дБ.

Рост БРУМ с повышением несущей частоты, похоже, объясняется ростом критической полосы и захватом в нее все большей части спектра *однополупериодной АМ* (рис. 3).

Влияние маскировки низкочастотного диапазона базилярной мембраны на пороги обнаружения интераурально противофазной периодической компоненты в шумовой модулирующей функции и на пороги латерализации по интерауральной разности фаз амплитудной модуляции высокочастотных сигналов как будто бы говорит в пользу нелинейного механизма бинаурального демаскирования на высоких частотах. Однако эту гипотезу трудно принять. Как отмечалось выше, интераурально противофазный тон в условиях *однополупериодной АМ* обнаруживается по признаку субъективного отделения от центрального акустического образа правой и левой боковых частей (что можно также назвать и обнаружением декорреляции). Согласно отчетам испытуемых, они выслушивают и обнаруживают этот признак не в низкочастотной, а в высокочастотной области, где маскировка чистых тонов со стороны НЧ-маскера, как мы видели, практически отсутствует. Можно предположить, что этот признак, будучи более чувствительным при обнаружении полезного сигнала, оказывается также более чувствительным и к влиянию помех. И, наконец, возможно, маскирование происходит не на базилярной мембране, а выше, хотя это и представляется маловероятным. Заметим, что в традиционных условиях маскировки НЧ-тона узкополосным маскером условия *однополупериодной АМ* осуществляются сами собой из-за детектирования при

рецепции, однако при добавлении интерурально противофазного тона к диотическому узкополосному маскеру признак развала акустического образа на три части не возникает или еле заметен, и БРУМ не превышает 15 дБ [10].

Следует обратить внимание и на то, что некоторые наши результаты заметно отличаются от известных из литературы. В частности, были получены на порядок меньшие значения порогов латерализации по интерауральной задержке амплитудной огибающей (40–80 мкс), причем вне зависимости от маскировки НЧ-диапазона базилярной мембраны [15]. Правда, в одной из недавних работ [16] получены результаты, сходные с нашими. В этой работе авторы измерили пороги латерализации по интерауральной задержке синусоидальной 100% АМ (порог латерализации 200 мкс) и *однополупериодной АМ*, в терминологии авторов "transposed tone" (порог 100 мкс), чья огибающая была задумана, как пишут авторы, чтобы обеспечить ВЧ-каналы информацией, доступной в НЧ-каналах, то есть по тем же соображениям, что и в наших работах [8–12]. В наших опытах мы также наблюдали уменьшение порогов латерализации в условиях *однополупериодной АМ*.

Вполне возможно, что отдельные расхождения наших данных и данных других авторов объясняется как малочисленностью, так и возрастным составом группы слушателей.

Ниже приводятся основные результаты проведенных экспериментальных исследований.

– БРУМ при обнаружении периодической компоненты в амплитудной огибающей высокочастотных тонов составляет 15–25 дБ, если перед модуляцией модулирующая функция проходит однополупериодное выпрямление (условия *однополупериодной АМ*).

– В экспериментальных условиях *линейной АМ*, то есть без однополупериодного выпрямления модулирующей функции, БРУМ находится в пределах 10 дБ.

– БРУМ в условиях *однополупериодной АМ* растет вместе с ростом частоты несущей.

– БРУМ в условиях *однополупериодной АМ* снижается и не растет с частотой несущей, если модулирующая функция после линейного детектора проходит полосный НЧ-фильтр с частотой среза, близкой к верхней частоте узкополосного маскера в огибающей.

– БРУМ в условиях *однополупериодной АМ* резко снижается при маскировке НЧ-диапазона базилярной мембраны главным образом за счет повышения порога маскировки бинауурально противофазной ритмической компоненты модулирующей функции.

– Пороги латерализации по фазовым интерауральным различиям низкочастотной амплитудной огибающей резко повышаются при маскировке НЧ-диапазона базилярной мембраны.

– Пороги латерализации по амплитудным интерауральным отличиям не зависят от маскировки НЧ-диапазона базилярной мембраны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-04-48746).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hirsh I.J.* The influence of interaural phase on interaural summation and inhibition // J. Acoust. Soc. Amer. 1948. V. 20. № 4. P. 536–544.
2. *Bernstein L.R., Trahiotis C.* Discrimination of interaural envelope correlation and its relation to binaural unmasking at high frequencies // J. Acoust. Soc. Amer. 1992. V. 91. № 1. P. 306–316.
3. *Bernstein L.R., Trahiotis C.* On the use of the normalized correlation as an index of interaural envelope correlation // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. № 3. P. 1754–1763.
4. *Bernstein L.R., Trahiotis C.* The normalized correlation: Accounting for binaural detection across center frequency // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. № 6. P. 3774–3784.
5. *Bernstein L.R., Par S., Trahiotis C.* The normalized interaural correlation: Accounting for NoSπ thresholds obtained with Gaussian and "low-noise" masking noise // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 106. № 2. P. 870–876.
6. *Eddins D.A., Barber L.E.* The influence of stimulus envelope and fine structure on the binaural masking level difference // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 3. Pt. 1. P. 2578–2589.
7. *Hall J.W., Grose J.H., Hartman W.M.* The masking-level difference in low-noise noise // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 5. Pt. 1. P. 2573–2577.
8. *Телепнев В.Н., Тарасова М.В., Дубровский Н.А.* Бинауральное демаскирование амплитудно-модулированных сигналов / Тр. 10 сес. Рос. акуст. общ. М.: 2000. Т. 2. С. 270–273.
9. *Telepnev V.N., Tarasova M.V., Dubrovsky N.A.* Binaural unmasking of amplitude-modulated signals / http://www.akin.ru/Docs/Rao/Ses10/sp8.PDF
10. *Телепнев В.Н., Тарасова М.В., Дубровский Н.А., Сухорученко М.Н., Соснина О.В., Борисов Ф.Ю.* Бинауральное демаскирование в амплитудной модуляции на высоких частотах // Сенсорные системы. 2003. Т. 17. № 2. С. 158–165.
11. *Телепнев В.Н., Дубровский Н.А.* Частотная зависимость бинаурального демаскирования амплитудно-модулированных сигналов/Сборник трудов 13 сес. Рос. акуст. общ. М.: 2003. Т. 3. С. 247–250.
12. *Telepnev V.N., Dubrovsky N.A.* Frequency dependence of binaural unmasking for amplitude-modulated signals / http://www.akin.ru/Docs/Rao/Ses13/M23.PDF

13. *Flanagan J.L., Watson B.J.* Unmasking of Complex Signals // J. Acoust. Soc. Amer. 1966. V. 40. № 2. P. 456–468.
14. *Цвикер Э., Фельдкеллер Р.* Ухо как приемник информации // М.: Связь, 1971. С. 64.
15. *Henning G.B.* Detectability of interaural delay in high-frequency complex waveforms // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 55. № 1. P. 84–90.
16. *Bernstein L.R., Trahiotis C.* Enhancing sensitivity to interaural delays at high frequencies by using "transposed stimuli" // J. Acoust. Soc. Amer. 2002. V. 112. № 3. Pt. 1. P. 1026–1036.

Binaural Unmasking of the Periodic Component in the Envelope of an Amplitude-Modulated Signal

V. N. Telepnev

A binaural unmasking of a tone component that is present in an amplitude–time noise envelope of a high-frequency signal is studied. The signal has the form of a sinusoidal carrier of frequency 2000–5000 Hz amplitude modulated by a low-frequency signal. The modulating function is a mixture of a 300-Hz tone (interaurally in-phase or antiphase) and a dichotic masking noise within 0–400 Hz, this mixture being subjected to a half-wave linear rectification. The listener has to detect the rhythmic component in the modulating noise function. It is shown that, under the aforementioned conditions, the binaural difference in masking levels grows up to 25 dB with increasing carrier frequency but drastically decreases in the case of a masking of the low-frequency part of the basilar membrane in the vicinity of 300 Hz. The lateralization based on the interaural phase of a 100% amplitude modulation by a 300-Hz tone at a carrier frequency within 2000 to 5000 Hz also drastically decreases (in our experiments) when the low-frequency part of the basilar membrane is masked.