

УДК 591.185.1:612.85

МАСКИРОВКА КОРОТКИХ СТИМУЛОВ ШУМАМИ С ГРЕБЕНЧАТЫМИ СПЕКТРАМИ: I. ПРОЯВЛЕНИЯ КОМПРЕССИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ УЛИТКИ И ОЦЕНКА ЧАСТОТНОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

© 2011 г. Л. К. Римская-Корсакова, М. Р. Лалаянц*, А. Я. Супин**, Г. А. Таварткиладзе*

ФГУП Акустический институт им. ак. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: lkrk@mail.ru

* ФГУ Российский научно-практический центр аудиологии и слухопротезирования

117513 Москва, Ленинский пр. 123

** Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

117071 Москва, Ленинский пр. 33

Поступила в редакцию 17.09.09 г.

В работе рассмотрен психоакустический метод измерения порогов маскировок, в котором использованы однотипные стимулы и маскиры, для обнаружения проявлений компрессивной нелинейности смещений базилярной мембраны улитки и оценки частотной разрешающей способности слуха в узкой области частот вблизи центральной частоты стимула. В качестве стимулов (названных компактными) были использованы высокочастотные импульсы с огибающей в форме гауссовой функции и синусоидальным заполнением, имевшие ширину частотной полосы, соответствующую ширине критической полосы слуха. В качестве маскеров были использованы шумы с гребенчатой структурой амплитудного спектра, с ограниченной шириной частотной полосы. При равенстве центральных частот стимулов и маскеров, $on_{(rip)}$ -частотным маскером был назван полосовой шум, у которого центральная частота совпала с гребнем изрезанного спектра, а $off_{(rip)}$ -частотным маскером — полосовой шум, у которого центральная частота совпала с провалом изрезанного спектра. Центральные частоты и частотные полосы стимулов и маскеров были равны 4 кГц и 1000 Гц, соответственно. Частота гребней (провалов) изрезанного амплитудного спектра маскера — 1000 Гц. В условиях последовательной и одновременной маскировок зависимости порогов $on_{(rip)}$ -частотных маскировок компактных стимулов от уровня маскера обнаруживали проявления компрессивной нелинейности смещений базилярной мембраны, однако лучше визуализировали эти проявления разность порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -частотных маскировок. Оценка частотной разрешающей способности, полученная в условиях одновременной маскировки компактных стимулов при варьировании частоты гребней изрезанного спектра маскеров низких и средних уровней, соответствовала ширине критической полосы слуха, измеренной классическим методом маскировки тонов парой узкополосных шумовых маскеров. В диапазоне частот гребней 500–2000 Гц крутизна зависимости $off_{(rip)}$ -маскировки компактных стимулов от частоты гребней уменьшалась при росте уровней маскеров, что могло указывать на влияние компрессивных свойств смещений базилярной мембраны на эту характеристику.

ВВЕДЕНИЕ

В последние 30 лет в области микромеханики улитки был сделан ряд существенных открытий [1–5]: обнаружено, что колебания базилярной мембраны (БМ) улитки поддерживаются активным механизмом наружных волосковых клеток (НВК), который тесно связан с их пьезоэлектрическими свойствами, т.е. изменениями длины клетки при изменении знака ее электрического потенциала.

Активный механизм НВК, усиливая резонансные свойства БМ, не только участвует в формировании широкого динамического диапазона, но и

обеспечивает высокую чувствительность и частотную избирательность слухового анализа [1–5]. При совпадении частоты сигнала с характеристической частотой (ХЧ) места регистрации смещений БМ, зависимость амплитуды смещений БМ от уровня входного сигнала (характеристика вход-выход) имеет нелинейный профиль. Т.е. если при низких и высоких уровнях сигнала амплитуда смещений БМ линейно растет с ростом уровня, то при средних уровнях (в диапазоне 40–60 дБ УЗД) профиль зависимости имеет перегиб. Область перегиба называют областью компрессивной нелинейности смещений БМ (КНБМ). При уровнях сигналов, соответствующих области пе-

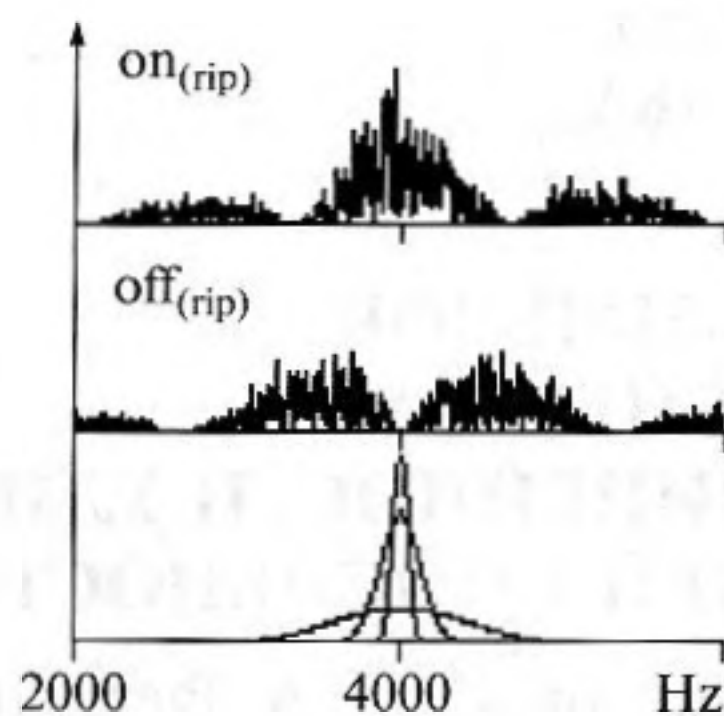


Рис. 1. Спектры маскеров и стимулов, используемых для оценки свойств компрессивной нелинейности БМ и частотной разрешающей способности. Сверху вниз спектры $op_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -частотных маскеров и спектры стимулов с одинаковой центральной частотой, но разной шириной частотной полосы. По оси абсцисс — частота в Гц; по оси ординат — спектральный уровень.

региба, НВК теряют свои пьезоэлектрические свойства. При низких уровнях сигналов (т.е. пока НВК сохраняют указанные выше свойства) электрофизиологи регистрируют самую высокую частотную избирательность БМ. Но она понижается с ростом уровней стимулов. Если частота сигнала выше или ниже ХЧ места регистрации смещений БМ, то НВК не проявляют своих пьезоэлектрических свойств. При этом профили характеристик вход-выход остаются линейными в широком (0–100 дБ УЗД) диапазоне уровней стимулов. При нарушении функций НВК БМ теряет свои компрессивные и частотно-избирательные свойства. В подавляющем большинстве случаев у пациентов с сенсоневральной тугоухостью регистрируются разные формы нарушений функций НВК [6].

Исходя из особенностей упомянутых выше характеристик вход-выход [1–5], психоакустики смогли выявить проявления КНБМ в слуховых реакциях [6–15] путем сравнения порогов обнаружения коротких высокочастотных стимулов в присутствии on - и off -маскеров. (Тот masker, у которого центральная частота совпадает (или не совпадает) с центральной частотой стимула, называется on - (или off -) частотным маскером.) Авторы первой из таких работ [7] измерили зависимости порогов обнаружения тональных импульсов с частотой 6 кГц от уровней тональных маскеров с частотами 6 кГц (функция on -маскировки) и 3 кГц (функция off -маскировки). Варьируемым параметром был уровень маскеров, а уровень стимулов оставался постоянным. Желая свести к минимуму нежелательные нелинейные эффекты взаимодействия стимулов и маскеров на БМ (такие как формирование комбинационных тонов и подавление), авторы использовали последовательную маскировку и минимальную, со-

ставляющую единицы мс, задержку между стимулами и маскерами. Оказалось, что профиль функции on -маскировки был линейным, а профиль функции off -маскировки — нелинейным. Авторы предположили, что линейный профиль был обусловлен одинаковым влиянием КНБМ на стимул и masker, в то время как нелинейный — не одинаковым.

Впоследствии проявления КНБМ были обнаружены в профилях временных функций on - и off -маскировок или зависимостях порогов обнаружения от задержки между стимулами и маскерами [9, 10, 14, 15], а также в наклонах психометрических кривых обнаружения тональных импульсов, предъявляемых в условиях последовательной маскировки [12, 13]. Учитывая роль НВК в формировании широкого динамического диапазона, высокой чувствительности и частотной избирательности слухового анализа, учитывая невысокую точность психоакустических данных, справедливо указывалось [6], что методы обнаружения КНБМ следовало бы совместить с оценкой частотной разрешающей способности (ЧРС). Известно много методов для оценки ЧРС [16–23]. Это — двухтоновый метод маскировки [17], метод измерений психофизических настроечных кривых [18], метод оценки ширины слуховых фильтров при маскировке тонов в шумах со спектральными вырезками [19, 20] или с гребенчатой структурой спектров [21, 22], метод, в котором шумы с гребенчатой структурой спектра были использованы в качестве стимулов [23]. Однако при использовании разнородных стимулов и маскеров совместные оценки КНБМ и ЧРС могут быть трудоемкими, а полученные результаты — неоднозначными для интерпретации [6].

В данной работе рассмотрен метод, в котором для обнаружения проявлений КНБМ и оценки ЧРС были использованы одностипные стимулы и маскеры. Также как и в работах [7, 9, 10, 14, 15], метод предусматривал сравнение порогов обнаружения стимулов в присутствии on - и off -маскеров. Маскерами были шумы с гребенчатой структурой амплитудного спектра. Если центральные частоты спектров стимулов и маскеров одинаковы, тогда $on_{(rip)}$ -частотным маскером был шум, у которого центральная частота совпала с частотой гребня изрезанного спектра, а $off_{(rip)}$ -частотным маскером — шум, у которого центральная частота совпала с частотой провала изрезанного спектра (рис. 1). Стимулами были короткие высокочастотные стимулы с шириной полосы частот, соизмеримой с шириной критической полосы слуха (рис. 2). Такие стимулы были названы компактными.

Хорошей моделью компактных стимулов являются импульсы с огибающей в форме гауссовой

функции и синусоидальным заполнением:

$$S(t) = A \cos(2\pi t F_c) \exp\left(-\frac{\pi t^2}{D^2}\right),$$

где A — пиковое значение амплитуды стимула, F_c — частота в Гц, t — время в с. При этом ширина полосы частот B и длительность D стимулов связаны отношением $B = 1/D$.

При выборе стимулов учитывалось известное представление о кодировании интенсивности звуков в слуховой системе. Принято считать, что в зависимости от длительности стимулов интенсивность может кодироваться на периферии либо средней частотой импульсации (числом потенциалов действия, возникших за единицу времени), волокон слухового нерва (ВСН), либо числом участвующих в ответе ВСН [24–26].

Определим порог слухового обнаружения как минимальное приращение уровня (интенсивности) стимула, выделяемого слуховой системой. Тогда минимальное приращение (порог), сформированный в ответ на короткий стимул с широким спектром, будет пропорционален изменению числа возбужденных ВСН с широким набором ХЧ, но не будет пропорционален смещениям узкого участка БМ (рис. 2). Порог обнаружения тональных узкополосных стимулов будет формироваться пропорционально свертке средней частоты импульсации волокон, в величине которой учитываются свойства адаптации и рефрактерности самих волокон, с функцией, учитывающей временное интегрирование, адаптацию, торможение и др. слуховой системы в целом [27]. В этом случае пороги могут не сохранить особенности смещений узкого участка БМ, поскольку будут формироваться с учетом указанных временных процессов слухового анализа [28].

Компактные стимулы (рис. 2) кодируются синхронной однократной реакцией ВСН с ХЧ, объединенными механизмом критических полос. Поскольку такая реакция не зависит от вызванных стимулами свойств восстановления возбудимости ВСН и слуховой системы в целом, мы ожидаем, что пороги могут быть пропорциональны числу однократно возбужденных волокон, связанных через внутренние волосковые клетки (ВВК) с узким участком БМ, и это число в свою очередь может быть пропорционально смещениям БМ.

Если компактные стимулы предъявлять после окончания продолжительных маскеров через время, примерно равное периоду относительной рефрактерности (т.е. 20–30 мс), то непосредственное частотно-временное взаимодействие стимулов и маскеров должно отсутствовать и на БМ, и в реакциях ВСН. Однако благодаря адаптации действие продолжительных маскеров способно вызывать сдвиг чувствительности [29, 30] волокон¹.



Рис. 2. Компактный частотно-временной стимул, по сравнению с короткими и тональными стимулами, имел частотную полосу, равную ширине критической полосы слуха или ширине слухового фильтра, и минимальную длительность, которая обеспечивала возникновение однократной реакции волокон слухового нерва с близкими характеристическими частотами.

Вызванный оп-маскерами средних уровней компрессивный рост смещений БМ может вызвать “компрессивный” сдвиг чувствительности волокон, который может сдерживать и рост числа однократно возбужденных стимулами волокон, и рост слуховых порогов обнаружения этих стимулов.

В данной работе с целью проверки этой гипотезы и обнаружения КНБМ, измерялись пороги обнаружения компактных и тональных стимулов, которые предъявлялись в условиях последовательной и одновременной $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок. Учитывая важную роль НВК в формировании не только широкого динамического диапазона, но и частотной избирательности слухового анализа, в работе также анализировалась пригодность компактных стимулов, а также $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскеров для оценки ЧРС. Для этого измерялись пороги обнаружения стимулов в присутствии маскеров, у которых варьируемым параметром была частота гребней спектров (рис. 1). За предельную величину ЧРС принималась та частота гребней, при которой пороги обнаружения стимулов в присутствии $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскеров совпадали.

¹ Известно, что волокна слухового нерва, связанные с одной внутренней волосковой клеткой, имеют узкие динамические диапазоны, составляющие 30–40 дБ [31] и разброс порогов реакций, оцениваемый примерно в 20 дБ [32]. При средних уровнях маскеров большинство возбужденных волокон, практически достигнув своего максимального возбуждения, должны быть под влиянием процессов адаптации [29, 30].

Отметим, что данная работа, затрагивая вопросы слухового кодирования звуков и способствуя разработке методов, позволяющих по слуховым реакциям судить о сохранности аппарата НВК, имеет фундаментальную и прикладную направленность.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились в звукозаглушенной камере Акустического института. Был использован аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий генерацию стимулов, управление экспериментом и протоколирование данных [33, 34]. Стимулы и маскиры формировались в ходе проведения экспериментов цифровым способом в виде файлов. Для проигрывания файлов использовался 16-битный цифро-аналоговый звуковой адаптер Creative SB Live! 1024, имеющий соотношение сигнал/шум 90 дБ и частоту квантования 44.1 кГц. Для фиксации реакций испытуемых использовалось подключенное к компьютеру через последовательный порт устройство сигнализации и обратной связи (пульт). При нажатии клавиш пульта программа формировала порции отчета эксперимента и генерировала новую испытательную последовательность.

Для определения порогов обнаружения стимулов в программе была реализована адаптивная методика двухальтернативного вынужденного выбора. Испытательная последовательность имела два интервала, длительностью 0.7 с, разделенные паузой в 0.8 с. Стимул предъявляли в одном из интервалов в случайном порядке. Испытуемый, путем нажатия на одну из двух клавиш пульта, сообщал, в каком из интервалов он слышит стимул. После двух правильных ответов амплитуда стимула уменьшалась на 30%, после одного неправильного — увеличивалась на 30%. Момент уменьшения или увеличения амплитуд стимулов являлся точкой поворота. При изменении амплитуд “два вниз, один вверх” измеренный порог соответствовал 71% правильного распознавания стимулов по психометрической кривой [35]. Если ошибка среднего значения порога по первым четырем точкам поворота достигала 2 дБ, то шаг уменьшения/увеличения амплитуд уменьшался в два раза, но никогда не был меньше 7.5%. В одной серии измерений за порог принимали среднее значение амплитуд стимулов, определенное по последним восьми из одиннадцати точек поворота. Вначале проводили четыре серии измерений порогов. В качестве порога обнаружения стимула было принято значение медианы, полученной по результатам этих серий. Для оценки точности определения порогов — также ошибку среднего значения порогов. Как правило, эта величина не превышала 1 дБ, но, если по результатам четырех

серий измерений она достигала 2 дБ и более, то проводились дополнительные серии измерений.

Как уже было указано, в качестве стимулов были использованы импульсы с синусоидальным заполнением и огибающей в форме гауссовой функции. Максимум спектра стимула был равен 4 кГц. Ширина частотной полосы на уровне 0.7 от максимума амплитуды могла иметь значения 800, 200, 40 или 8 Гц. Уровни стимулов определяли по пиковой амплитуде в дБ УЗД, которая соответствовала уровню звукового давления непрерывного тона, или в дБ над порогом слышимости (дБ ПС), вычисленной относительно амплитуды стимула, соответствующей порогу слышимости.

Изрезанная (гребенчатая) структура спектра маскира формировалась путем сложения или вычитания шумовой посылки с собственной копией, задержанной на некоторую величину T_m . При сложении формировался маскир, у которого центральная частота совпадала с частотой гребня изрезанного спектра, а при вычитании — маскир, у которого центральная частота совпадала с частотой провала изрезанного спектра. Частота гребней изрезанного спектра маскира F_{rip} была обратно пропорциональна величине T_m . Она могла иметь значения 2000, 1000, 800, 500, 400, 200 Гц. Центральная частота маскира и ширина его частотной полосы на уровне 0.7 от максимума среднеквадратичного отклонения составляли 4 кГц и 1000 Гц, соответственно. Фронт нарастания и спада временного профиля маскира был линейным и имел длительность 5 мс. Его уровень оценивался в дБ УЗД непрерывного тона, амплитуда которого была равна среднеквадратичному отклонению шума или в дБ ПС относительно значения среднеквадратичного отклонения, полученного на пороге слышимости шума. При одновременной маскировке длительность шума была равна 0.7 с, а задержка между серединой стимула и началом шума — 0.5 с. При последовательной маскировке длительность шума была равна 0.5 с; а задержка между концом шума и серединой стимула — 20 мс.

В измерениях приняли участие трое испытуемых женского пола без явных нарушений слуховой функции. Один испытуемый имел возраст 50 лет (И1), возраст других — 25 лет. Испытуемые И1 и И2 имели многочасовой опыт измерений. Испытуемый И3 имел предварительную 2–3-часовую практику.

Стимулы предъявлялись испытуемым диотически или моноурально на правое ухо через головные телефоны Shennheiser HD-265. Перед основными измерениями для каждого испытуемого были определены пороги слышимости каждого из видов стимулов и маскиров. За порог обнаружения $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскиров принимался порог обнаружения полосового шума без изрезанности

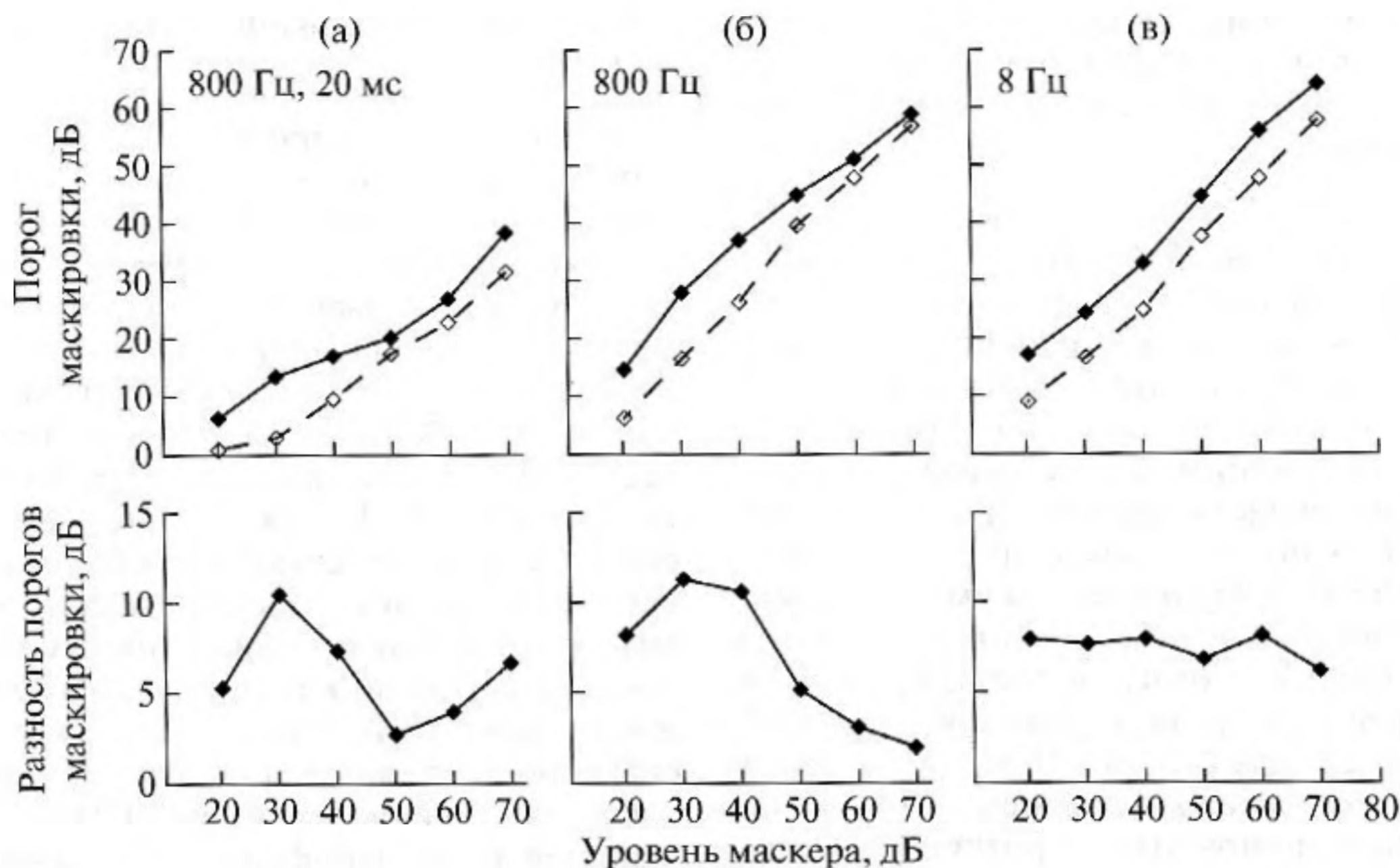


Рис. 3. Средние значения порогов маскировки и разности порогов маскировки, полученных при действии $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -частотных маскером для трех испытуемых. В колонке *a* показаны пороги для стимулов с полосой 800 Гц, которые предъявлялись через 20 мс после окончания действия маскиера. В колонках *б* и *в* – пороги, полученные для стимулов с полосой 8 и 800 Гц, которые предъявлялись одновременно с маскером. Частота гребней маскиера 2000 Гц. Пороги $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировки (вверху) показаны сплошной и пунктирной линиями, соответственно. По оси абсцисс – уровень маскиера в дБ ПС. По оси ординат: вверху – порог маскировки в дБ; внизу – разность порогов маскировки, полученная как разность порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -частотных маскировок, в дБ.

с центральной частотой 4 кГц, шириной полосы 1000 Гц и длительностью 0.7 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость порогов маскировки от уровня маскиера. Цель данной серии измерений состояла в обнаружении КНБМ в функциях маскировок или в зависимостях порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок стимулов от уровня маскиера.

Полученные для трех испытуемых пороги маскировки, вычисленные как разность между порогом обнаружения стимулов в присутствии и в отсутствие маскером, показаны на рис. 3. Диапазон изменения уровней маскером составлял 20–70 дБ над индивидуальным порогом слышимости. Для оценки взаимодействия стимулов и маскером на БМ и в слуховой системе в целом, для оценки роли периферии в слуховом анализе, были измерены пороги обнаружения компактных (полоса 800 Гц и длительность 1.25 мс) и тональных (полоса 8 Гц и длительность 125 мс) стимулов в условиях последовательной (рис. 3а) и одновременной (рис. 3б,в) маскировок. Частота гребней спектров маскером составляла 2000 Гц. Поскольку тенденции изменений индивидуальных порогов у испытуемых совпадали, данные были усреднены. Ошибка средних значений была меньше 2 дБ для

стимулов с полосой 800 Гц, и меньше 5 дБ для стимулов с полосой 8 Гц (не показаны).

Если компактному стимулу предшествовал $off_{(rip)}$ -маскер, то зависимость порогов маскировки от уровня маскиера была практически линейной (рис. 3а). При действии $on_{(rip)}$ -маскером зависимость порогов имела нелинейный профиль: в диапазоне средних уровней 30–50 дБ ПС она имела перегиб. Еще легче этот перегиб можно обнаружить, анализируя профиль зависимости разности порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -частотных маскировок от уровня маскиера. В области средних уровней профиль последней зависимости имеет два характерных перегиба и перепад разности порогов почти в 10 дБ (рис. 3а).

В условиях одновременной маскировки обнаруженный ранее перегиб порогов $on_{(rip)}$ -маскировок визуализируется заметно хуже (рис. 3б), чем таковой, полученный при последовательной маскировке (рис. 3а). Однако профиль зависимости разности порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок от уровня маскиера по-прежнему визуализирует этот перегиб в области средних уровней маскером (рис. 3б). При этом максимальное значение разности в 12 дБ было получено при уровнях маскером в 30 дБ ПС.

Зависимости порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок тональных стимулов от уровней маскером

(рис. 3в) были близки к линейной. Поэтому разность порогов, примерно равная 8 дБ, оставалась неизменной во всем исследованном диапазоне уровней маскеров.

Сравним наши результаты с известными данными. Известно [17, 36–38], что при одновременном предъявлении тональных стимулов и широкополосных шумовых маскеров наклон функций оп-маскировки соответствует единице. В условиях последовательной маскировки наклон этой функции меньше единицы, но функция может иметь перегиб в области средних уровней маскеров [37, 39]. К основным факторам, определяющим поведение этой функции, таким как торможение, интегрирование и адаптация нейронных структур центральных отделов слуха, временное взаимодействие стимулов и маскеров на БМ, кратковременная адаптация ВСН, добавилась еще одна [38]. Как уже указывалось, если в качестве стимулов используются короткие стимулы, то сравнение профилей функций оп- и off-маскировок, по крайней мере, качественно, обнаруживает проявления КНБМ [7–11, 14, 15, 38].

В работе [40] авторы сравнили пороги одновременной оп-маскировки коротких (2 и 10 мс) и продолжительных (200 мс) сигналов с синусоидальным заполнением в 6.5 кГц, полученных для испытуемых с нормальным слухом и с кохлеарной патологией. Сигнал предъявляли через 200 мс после начала действия шумового маскера длительностью 400 мс. У испытуемых с нормальным слухом на пороге обнаружения отношение спектральных плотностей продолжительных сигналов и шума сохранялось постоянным при изменении спектральной плотности шума от –10 до 50 дБ УЗД. То же отношение, полученное для коротких стимулов (2 и 10 мс), в области уровней шума 20–30 дБ имело локальный экстремум. Однако подобный экстремум не был обнаружен у испытуемых с кохлеарной патологией. Авторы указали, что наличие экстремума, выявляемого при действии коротких стимулов, может быть следствием проявлений КНБМ. Если полученные авторами [40] зависимости представить в виде функций маскировки, то у испытуемых с нормальным слухом при действии продолжительных стимулов эти функции были бы линейны. При подобном представлении результатов действие коротких стимулов сопровождалось бы появлением перегиба в области средних уровней маскеров, который, полагаем, мог быть подобен таковому, полученному нами в условиях оп_(rip)-маскировки (рис. 3б). Характерный перегиб функции оп-маскировки обнаружен в работах [41, 42], но в случае, когда высокочастотный стимул длительностью 10 мс предъявлялся одновременно с шумом длительностью 400 мс и без задержки начала стимула относительно начала маскера. Полученные резуль-

таты также трактовались авторами в терминах КНБМ.

Функции маскировок, полученные для тональных стимулов (рис. 3в), не обнаруживают проявлений КНБМ, вероятно, из-за влияния центральных процессов слухового анализа. На такое влияние указывает совпадение функций маскировок, которые были получены у испытуемых с нормальным слухом и кохлеарными имплантами в ответ на действие стимулов длительностью более 20 мс [43]. На такое влияние указывают данные работы [31], в которой авторы сравнили свойства порогов слухового обнаружения, измеренных в условиях последовательной маскировки, со свойствами адаптации ВСН шиншиллы. Так, при длительности стимулов в 25 мс и при наличии качественного сходства количественное сравнение величин маскировок, оцененных психофизически и по реакциям ВСН, не выявило решающей роли периферии в механизмах маскировки. Таким образом, известные и полученные нами данные указывают на то, что обнаружение свойств периферической обработки в слуховых реакциях связано с длительностью стимулов. Короткие высокочастотные стимулы способствуют обнаружению этих свойств.

Полагаем, что полученные нами данные (рис. 3) могут быть объяснены с позиции гипотезы, положенной нами в основу выбора стимулов, маскеров и условий маскировки. Согласно гипотезе, после окончания действия оп_(rip)-маскеров средних уровней за счет адаптации след от маскера сохраняется в виде “компрессивного” сдвига чувствительности ВСН. При предъявлении компактных стимулов через 20 мс после окончания оп_(rip)-маскеров, из-за отсутствия частотно-временного взаимодействия стимулов и маскеров на БМ и в реакциях ВСН, “компрессивный” сдвиг чувствительности ВСН соответственным образом влияет на увеличение числа однократно возбужденных стимулами ВСН, и, как следствие, на увеличение порогов обнаружения этих стимулов. Однако если компактный стимул предъявлять в условиях последовательной off_(rip)-маскировки, то будет иметь место другая ситуация. Увеличение уровня off_(rip)-маскера, вероятно, увеличивает число вовлеченных в реакцию волокон, характеристические частоты которых примыкают к краям частотного диапазона стимула. При той частоте гребней шумового маскера, которая была использована в исследовании, маскирующий эффект off_(rip)-маскера будет скорее обусловлен ограничением числа волокон, готовых к реакции на стимул, чем изменением свойств НВК из частотного диапазона стимула, как это имело место при действии стимулов и маскеров, использованных в работе [7]. Исходя из этого, мы ожидали, что зави-

симось порогов $off_{(rip)}$ -маскировки от уровней маскером окажется линейной.

Действительно, при предъявлении компактных стимулов через 20 мс после окончания маскира, измеренная нами функция $off_{(rip)}$ -маскировки была практически линейной, а функция $on_{(rip)}$ -маскировки обнаружила перегиб при средних уровнях маскером (рис. 3а), который, как мы полагаем, был следствием КНБМ. То, что независимо от условий (одновременной или последовательной) маскировки, разность порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок компактных стимулов обнаруживают КНБМ (рис. 3а и б), указывало на то, что возможные при одновременной маскировке эффекты нелинейного взаимодействия на БМ стимулов и маскером мало влияли на обнаружение КНБМ. Полагаем, что отличия результатов, полученных в данном исследовании, от результатов работы [7], были обусловлены не только различиями использованных стимулов и маскером, но и различиями причин, приводящих к обнаружению КНБМ.

Зависимость порогов маскировки от частоты гребней маскира. Цель измерений состояла в проверке пригодности компактных стимулов для оценки ЧРС. Предполагалось, что зависимость порогов маскировки от частоты гребней маскира должна оценить ЧРС примерно так же, как метод определения ширины критической полосы [16, 17], который предусматривал измерение порогов обнаружения тонов при маскировке шумом, спектр которого имел две полосы, разделенные частотным зазором (варьируемый параметр), а частота испытательного тона располагалась в середине зазора.

Для оценки ЧРС были использованы два критерия. Первый оценивал ЧРС частотой гребней маскира, при которой совпадали пороги $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок. Вторым — частотой, соответствующей перегибу зависимости порогов $off_{(rip)}$ -частотных маскировок от частоты гребней [17].

В первой серии измерений был использован первый критерий. Уровни маскером составляли 40 дБ ПС для испытуемых И1 и И2 и 30 дБ ПС для испытуемого И3. При этих уровнях у испытуемых разности порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок, полученные для компактных стимулов с полосой 800 Гц, были максимальными. Стимулы и маскером предъявлялись одновременно. Частота гребней маскером F_{rip} составляла 500, 800, 1000 и 1600 Гц. Поскольку индивидуальные данные имели общие тенденции, они были усреднены (рис. 4). Во всех случаях (рис. 4) пороги $on_{(rip)}$ -маскировок мало зависели от частоты гребней маскером. Пороги $off_{(rip)}$ -маскировок постепенно возрастали с уменьшением F_{rip} , достигая значений порогов $on_{(rip)}$ -маскировок. При действии

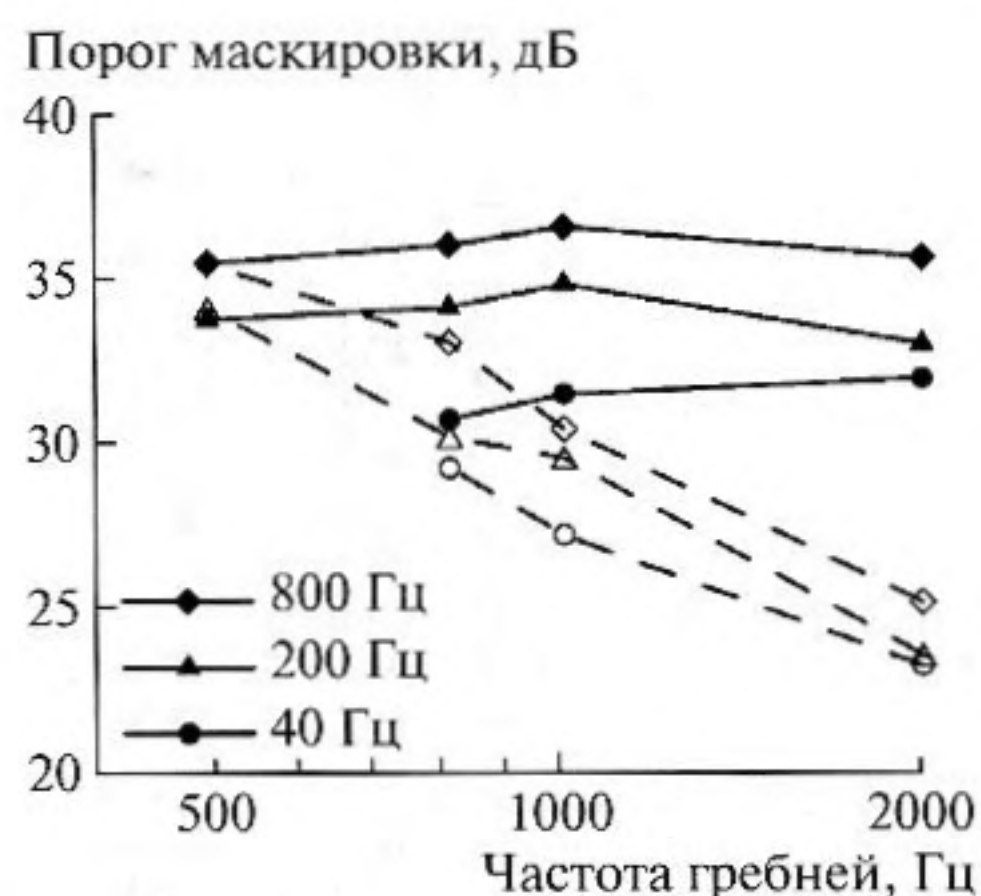


Рис. 4. Средние значения порогов $on_{(rip)}$ — (сплошная линия) и $off_{(rip)}$ — (пунктирная линия) частотных маскировок, полученные для трех испытуемых И1, И2, И3 для стимулов с разной частотной полосой (указаны как параметры). Стимул и маскером предъявлялись одновременно. По оси абсцисс — частота гребней маскира в Гц. По оси ординат порог маскировки в дБ.

стимулов с частотной полосой 800 Гц и 200 Гц ЧРС достигла 500 Гц, а при предъявлении стимулов с полосой 40 Гц — менее 800 Гц. Эти величины соответствуют оценкам ширины полосы пропускания слухового фильтра (10–13% от максимума спектра стимула) [19,20] и критической полосы слуха (20% от максимума спектра стимула) [16, 17].

Во второй серии измерений для оценки влияния ширины полосы стимулов и уровней маскером на значения порогов маскировки и, тем самым, на оценку ЧРС, измерения были повторены для двух испытуемых И1 и И3 (рис. 5). Были использованы компактные (полоса 800 Гц) и тональные (полоса 40 Гц) стимулы, и условия одновременной маскировки. Стимулы и маскером предъявляли моноурально на правое ухо. Уровни маскером составляли 20, 30 и 50 дБ ПС. ЧРС, полученная для тональных и компактных стимулов при использовании двух критериев, составила примерно 500 Гц и соответствовала ширине полосы пропускания слухового фильтра [7]. Для тональных (узкополосных) стимулов уровень маскира не влиял на крутизну зависимости $off_{(rip)}$ -маскировки компактных стимулов от частоты гребней. Однако для компактных стимулов в диапазоне частот гребней 500–2000 Гц крутизна такой зависимости уменьшалась с ростом уровня маскира. Если предположить, что при использовании компактных стимулов в основе оценок ЧРС и обнаружения проявлений КНБМ лежит однократная реакция периферических волокон, тогда можно ожидать существование связи между оценками ЧРС и КНБМ. Полагаем, что благодаря наличию такой связи крутизна зависимости $off_{(rip)}$ -маскировки компактных стимулов от ча-

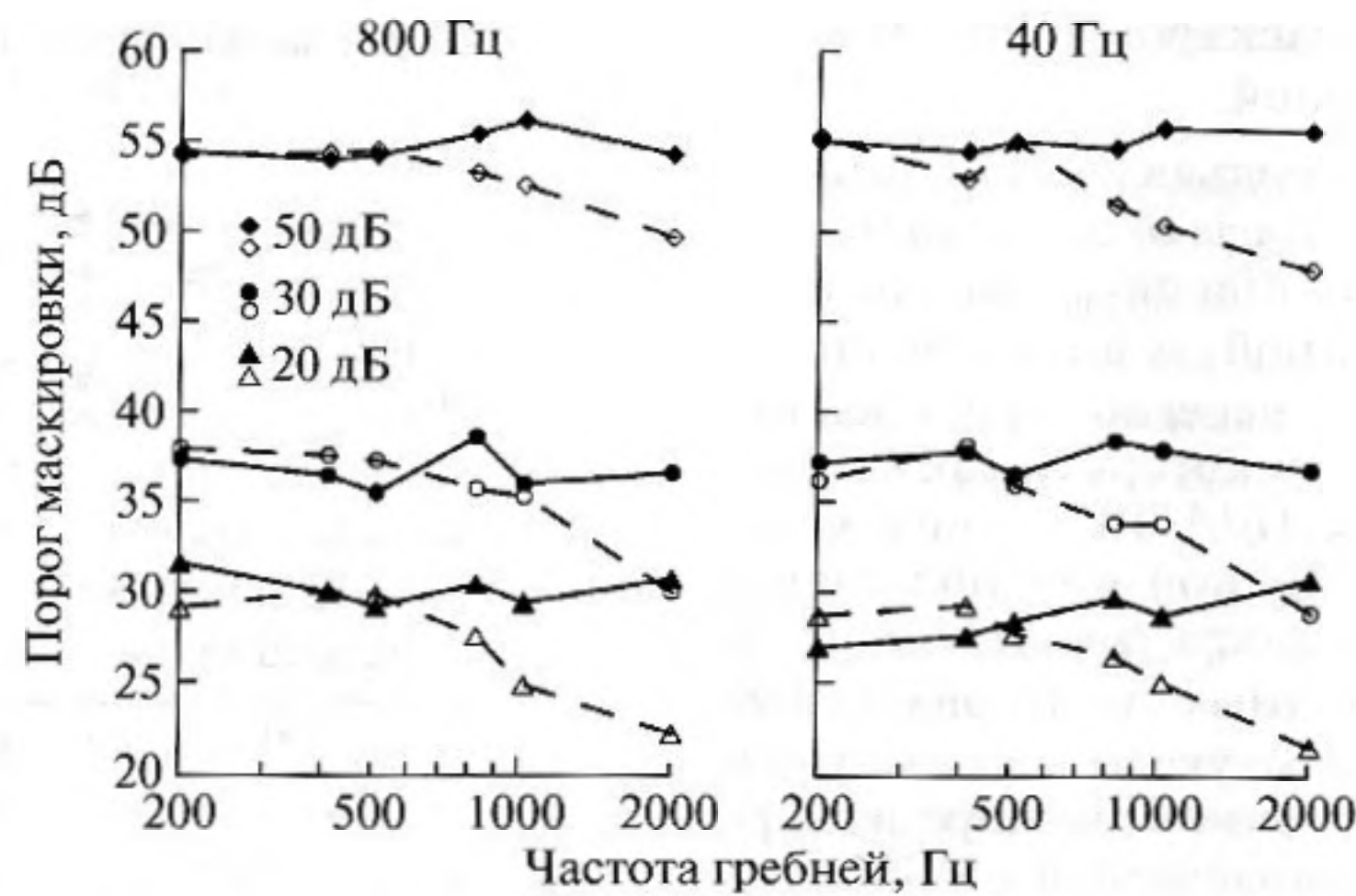


Рис. 5. Средние значения порогов $on_{(rip)}$ — (сплошная линия) и $off_{(rip)}$ — (пунктирная линия) частотных маскировок, полученные для испытуемых И1 и И3. Частотная полоса стимулов и уровни маскеров указаны как параметры. По оси абсцисс — частота гребней маскера в Гц. По оси ординат — порог маскировки в дБ.

стоты гребней уменьшалась при увеличении уровней маскеров (рис. 5). Однако мы не можем исключить и того, что изменение крутизны могло быть обусловлено сужением ширины области провалов при росте уровней маскеров.

Таким образом, измерения, проведенные с участием трех испытуемых, показали, что использование компактных стимулов в присутствии маскеров небольших уровней позволяет оценить ЧРС не хуже, чем использование тональных стимулов [16, 17]. Полученные результаты обнаружили влияние уровней маскеров на изменение крутизны зависимости $off_{(rip)}$ -маскировки компактных стимулов от частоты гребней. Это влияние могло быть следствием КНБМ.

ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрен метод обнаружения проявлений компрессивной нелинейности смещений базилярной мембраны (КНБМ) улитки человека и оценки частотной разрешающей способности (ЧРС) слуха. В качестве стимулов были использованы высокочастотные импульсы, частотная полоса которых была соизмерима с шириной критической полосы слуха. Эти стимулы были названы компактными. В качестве маскеров были использованы шумы с гребенчатой структурой амплитудных спектров. Ширина частотной полосы спектров маскеров также соответствовала ширине критической полосы.

Использование компактных стимулов было обусловлено особенностями их периферического кодирования в слуховой системе человека. Компактные стимулы вызывают синхронную однократную реакцию периферических волокон и нейронных структур центральной нервной систе-

мы. Поскольку такая реакция не зависит от временных процессов периферического кодирования и центрального анализа, считалось, что пороги обнаружения (маскировки) могут быть пропорциональны числу этих однократно возбужденных волокон.

Исходя из полученных экспериментальных данных, а также из сопоставления их с данными других авторов, был сделан вывод, что характерный перегиб профиля функции $on_{(rip)}$ -маскировки, полученный при последовательном предъявлении маскеров и компактных стимулов, возникал вследствие КНБМ. В условиях одновременной маскировки профиль такой же функции плохо обнаруживал проявления КНБМ. Однако профили разности порогов $on_{(rip)}$ - и $off_{(rip)}$ -маскировок хорошо обнаруживали проявления КНБМ в условиях и одновременного, и последовательного предъявления маскеров и стимулов.

Использование компактных стимулов и маскеров с гребенчатыми спектрами позволяет оценить ЧРС так же, как классический метод [16, 17], предусматривающий измерение порогов обнаружения тонов при маскировке шумом, спектр которого имел две полосы, разделенные частотным зазором, частота тона располагалась в середине зазора. Проведенные измерения обнаружили, что крутизна зависимости порогов $off_{(rip)}$ -маскировки компактных стимулов от частоты гребней в диапазоне 500–2000 Гц уменьшалась с ростом уровней маскеров, как мы полагаем, вследствие КНБМ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 08-04-00460, 10-04-00158.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rhode W.S.* Observations of the vibration of the basilar membrane in squirrel monkeys using the Mossbauer technique // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1971. V. 49. P. 1218–1231.
2. *Ruggero M.A., Rich N.C., Recio A., Narayan S.S.* Basilar-membrane responses to tones at the base of the chinchilla cochlea // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. P. 2151–2163.
3. *Recio A., Rich N.C., Narayan S.S., Ruggero M.A.* Basilar-membrane responses to clicks at the base of the chinchilla cochlea // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1998. V. 103. P. 1972–1989.
4. *Robles L., Ruggero M.A.* Mechanics of the mammalian cochlea // *Physiol. Rev.* 2001. V. 81. P. 1305–1352.
5. *Cooper N.P., Rhode W.S.* Mechanical responses to two-tone distortion products in the apical and basal turns of the mammalian cochlea // *J. Neurophysiol.* 1997. V. 78. P. 261–270.
6. *Moore B.C.J.* Psychoacoustics of normal and impaired hearing // *Hearing British Medical Bulletin* 2002. V. 63. P. 121–134.
7. *Oxenham A.J., Plack C.J.* A behavioural measure of basilar membrane nonlinearity in listeners with normal and impaired hearing // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. P. 3666–3675.
8. *Plack C.J., Oxenham A.J.* Basilar-membrane nonlinearity and the growth of forward masking // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1998. V. 103. P. 1598–1608.
9. *Nelson D.A., Schroder A.C., Wojtczak M.* A new procedure for measuring peripheral compression in normal-hearing and hearing impaired listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 2045–2064.
10. *Nelson D.A., Schroder A.C.* Peripheral compression as a function of stimulus level and frequency region in normal-hearing listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 2221–2233.
11. *Bacon S.P., Fay R.R., Popper A.N.* Compression: From Cochlea to Cochlear Implants. 2004. Springer, New York.
12. *Schairer K.S., Messersmith J., Jesteadt W.* Use of psychometric-function slopes for forward-masked tones to investigate cochlear nonlinearity // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2008. V. 124. P. 2196–2215.
13. *Schairer K.S., Nizami L., Reimer J.F., Jesteadt W.* Effects of peripheral nonlinearity on psychometric functions for forward-masked tones // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 113. P. 1560–1573.
14. *Lopez-Poveda E.A., Alves-Pinto A.* A variant temporal-masking-curve method for inferring peripheral auditory compression // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2008. V. 123. P. 1544–1554.
15. *Lopez-Poveda E.A., Plack C.J., Meddis R.* Cochlear nonlinearity between 500 and 8000 Hz in listeners with normal hearing // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2003. V. 113. P. 951–960.
16. *Фрейдлин А.А.* Критическая полоса слуха. Измерение КП разными методами // *Акуст. журн.* 1975. Т. 21. С. 806–814.
17. *Fastl H., Zwicker E.* Psychoacoustics – Facts and Models. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. 2007.
18. *Moore B.C.J.* Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1978. V. 63. P. 524–532.
19. *Patterson R.D.* Auditory filter shapes derived with noise stimuli // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1976. V. 59. P. 640–654.
20. *Glasberg B.R., Moore B.C.J.* Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data // *Hear. Res.* 1990. V. 47. P. 103–138.
21. *Houtgast T.* Auditory-filter characteristics derived from direct-masking data and pulsation-threshold data with a rippled-noise masker // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1977. V. 62. P. 409–415.
22. *Pick G.F.* Level dependence of psychophysical frequency resolution and auditory filter shape // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1980. V. 68. P. 1085–1095.
23. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Frequency-temporal resolution of hearing measured by rippled noise // *Hear. Res.* 1997. V. 108. P. 17–27.
24. *Гершуни Г.В.* Механизмы деятельности органа слуха и некоторых других рецепторов в свете современных электрофизиологических исследований // *Успехи соврем. биологии.* 1940. Т. 13. С. 1–40.
25. *Авакян Р.В., Радионова Е.А.* Особенности дифференциальных порогов по интенсивности для короткого звукового сигнала // *Акуст. журн.* 1962. Т. 8. С. 407–411.
26. *Радионова Е.А.* Опыты по физиологии слуха. СПб. Институт физиологии им. И.П. Павлова. 2003.
27. *Somjen G.* Sensory coding in the mammalian neuron system. 1972. N.Y. Educational division Meredith Corporation.
28. *Oxenham A.J.* Forward masking: adaptation or integration? // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2001. V. 109. P. 732–741.
29. *Relkin E.M., Turner C.W.* A reexamination of forward masking in the auditory nerve // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1988. V. 84. P. 584–591.
30. *Harris D.M., Dallos P.* Forward masking of auditory nerve fiber responses // *J. Neurophysiol.* 1979. V. 42. P. 1083–1107.
31. *Winter I.M., Robertson D., Yates G. K.* Diversity of characteristic frequency rate-intensity functions in guinea pig auditory nerve fibers // *Hear. Res.* 1990. V. 45. P. 191–202.
32. *Kiang N., Watanabe T., Thomas E., Clark L.* Discharge patterns of single fibers in cat's auditory nerve. 1965. Cambridge. MIT Press.
33. *Телепнев В.Н.* Бинауральное демаскирование периодической компоненты в огибающей амплитудно-модулированного сигнала // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50. С. 419–428.
34. *Римская-Корсакова Л.К.* Влияние периферического кодирования на слуховое распознавание коротких высокочастотных стимулов, предъявляемых в условиях прямой последовательной маскировки // *Сенсорные системы.* 2009. Т. 23. С. 106–116.
35. *Levitt H.* Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1979. V. 49. P. 467–477.

36. *Jesteadt W, Bacon S.P., Lehman J.R.* Forward masking as a function of frequency, masker level, and signal delay // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1982. 71, 950–962.
37. *Moore B.C.J., Glasberg B.R.* Growth of forward masking for sinusoidal and noise maskers as a function of signal delay: implications for suppression in noise // *J. Acoust Soc Am.* 1983. V. 73. P. 1249–1259.
38. *Moore B.C.J.* *Psychoacoustic.* Springer Handbook of Acoustics. Berlin. Springer-Verlag. 2007. D. P. 459–501.
39. *Oxenham, A.J., Plack, C.J.* Effects of masker frequency and duration in forward masking: Further evidence for the influence of peripheral nonlinearity // *Hear. Res.* 2000. V. 150. P. 258–266
40. *Oxenham A.J, Moore B.C.J., Vickers D.A.* Short-term temporal integration: Evidence for the influence of peripheral compression // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. P. 3676–3687.
41. *Bacon S.P.* Effect of masker level on overshoot // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1990. V. 88. P. 698–702.
42. *Bacon S.P., Savel S.* Temporal effects in simultaneous masking with on- and off- frequency noise maskers: Effects of signal frequency and masker level // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2004. V. 115. C. 1674–1683.
43. *Shannon R.V.* Forward masking in patients with cochlear implants. // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1990. V. 88. P. 741–744.