

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИИ И ЭВОЛЮЦИИ
имени А.Н. Северцова РАН

На правах рукописи

Нечаев

Дмитрий Игоревич

**ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА РАЗЛИЧЕНИЕ ЧЕЛОВЕКОМ
СЛОЖНЫХ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ**

03.03.06 – нейробиология

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель - д.б.н., проф. Супин А.Я.

Москва – 2015

Оглавление

1. Введение	4
2. Цели и задачи исследования	6
3. Литературный обзор	7
3.1. Слуховая улитка как основа частотной избирательности	7
3.2. Методы измерения частотной избирательности слуха	14
3.2.1. Нейронные настроечные кривые	14
3.2.2. Методы маскировки и концепция слуховых фильтров	14
3.2.3. Форма слухового фильтра	25
3.2.4. Паттерны возбуждения и паттерны маскировки.....	29
3.3. Оценка частотной избирательности слуха с использованием сложных сигналов. .	32
3.4. Частотные дифференциальные пороги	42
3.5. Воздействие помех и маскировка	48
3.6. Механизмы маскировки	51
3.6.1. Механизмы одновременной маскировки	52
3.6.2. Механизмы неодновременной маскировки	54
3.6.3. Влияние маскировки на различение частотного сдвига сигнала	55
4. Методика.....	60
4.1. Испытуемые	60
4.2. Параметры сигналов	60
4.3. Синтез сигналов	66
4.4. Процедура измерения	67
5. Результаты	69
5.1. Зависимость различения сдвига фазы гребенчатого спектра звукового сигнала от параметров тест-сигнала в отсутствии маскеров	70
5.1.1. Зависимость порога сдвига фазы от плотности гребней спектра и интенсивности сигнала	70
5.1.2. Зависимость порога сдвига фазы от плотности гребенчатого спектра и центральной частоты сигнала	74
5.1.3. Зависимость порогов различения фазового сдвига гребенчатого спектра от ширины гребней спектра	79

5.2. Влияние маскирующего шума на различия фазового сдвига гребенчатого спектра звукового сигнала	83
5.2.1. Маскировка при интенсивности тест-сигнала 50 дБ УЗД.....	83
5.2.2. Маскировка при интенсивности сигнала 80 дБ УЗД	86
5.2.3. Сравнение характера маскировки при совпадающем и низкочастотном маскере.....	88
6. Обсуждение	90
6.1. Участие «частотного» и «временного» механизмов в различении сдвига фазы в звуковом сигнале с гребенчатым спектром.....	90
6.2. Зависимость порога сдвига фазы от интенсивности сигнала	95
6.3. Зависимость порога сдвига фазы от центральной частоты спектра сигнала	96
6.4. Зависимость порога сдвига фазы от плотности и ширины гребней спектра	97
6.5. Влияние помех различной конфигурации на различение сдвига фазы гребенчатого спектра.....	101
6.6. Отличие частотных дифференциальных порогов для простых тонов от порогов различения частотного сдвига гребенчатого спектра	108
7. Заключение	109
8. Выводы.....	111
Список литературы	112

1. Введение

Многие естественные звуки, в том числе и звуки речи, характеризуются спектрально-временными «рисунками», представляющими собой вариации частотного спектра во времени. От того, насколько эффективно слуховая система способна воспринимать и анализировать частотно-временные «портреты» звуковых сигналов, во многом зависит распознавание этих сигналов. Эта способность в значительной степени зависит от остроты частотной настройки слуховых фильтров: чем уже полосы пропускания фильтров, тем острее частотная избирательность и тоньше частотный анализ. Но, с другой стороны, чем острее частотная избирательность, тем медленнее фильтры реагируют на изменения входного сигнала, т.е. хуже временное разрешение. Необходим оптимальный баланс между частотным и временным разрешением, чтобы обеспечить наилучшее различение частотно-временных звуковых «портретов». Поэтому частотная и временная избирательность слуховой системы была предметом детального исследования многих ведущих лабораторий.

В экспериментальной аудиологии было предложено множество способов для оценки частотной избирательности слуха, которые основаны на различных методах маскировки и отличаются друг от друга в основном характером применяемых маскеров.

Однако данные об остроте настройки частотно-избирательных фильтров не всегда позволяют предсказать реакцию на сигналы со сложным спектром. Для прямого измерения способности к различению сложных спектральных рисунков звукового стимула был предложен метод, основанный на реверсии фазы гребенчатого спектра шумового сигнала. Эксперименты показали, что способность к различению сложного спектрального рисунка не может быть предсказана моделью линейной системы с частотно-избирательными фильтрами, острота частотной избирательности которых оценена на основании работ с использованием различных типов маскировки.

Эти работы касались анализа стационарных звуковых сигналов, но многие натуральные звуковые стимулы характеризуются спектрально-временными рисунками, при которых их частотные спектры варьируют в течение действия сигнала: смещаются, растягиваются, сжимаются. Поэтому следующим этапом работы стала попытка прямого измерения порогов обнаружения динамических изменений в сложном звуковом сигнале,

т.е. определение того, насколько малые спектральные изменения в таком сигнале доступны для различения.

В основном, чувствительность слуховой системы к сдвигам частотного спектра исследовалась для чистых тонов, и пороги различения измерялись двумя способами: либо по результатам сравнения двух тональных посылок разной частоты, либо по результату обнаружения частотной модуляции тона. Однако чувствительность к сдвигам частоты чистого тона не даёт полного представления о чувствительности к спектрально-временным изменениям сложного сигнала. Чистые тоны – идеализированный случай: при отсутствии других частотных компонентов небольшие изменения частоты детектируются значительно легче, чем в сложных спектральных рисунках.

Поэтому следующим этапом работы стала попытка прямого измерения порогов обнаружения динамических изменений в сложном звуковом сигнале, т.е. определение того, насколько малые спектральные изменения в таком сигнале доступны для различения. В качестве модели сложного сигнала удобно использовать шум с гребенчатым спектром, в котором спектр сдвигается по оси частот. Такой спектр может быть строго охарактеризован ограниченным числом физических параметров: плотность, глубина и ширина гребней, центральная частота спектра. Соответственно, сдвиг гребенчатого рисунка по частотной шкале может служить моделью сложных частотно-временных рисунков. Первая часть настоящего исследования посвящена определению порогов различения частотного сдвига гребенчатого спектра шумового сигнала, при различных параметрах спектра.

В естественных условиях, как правило, целевой звуковой сигнала действует на фоне других звуков, которые по отношению к сигналу-цели играют роль помехи (маскера). Ранее уже было изучено влияние помехи различной конфигурации на частотную разрешающую способность слуха. Влияние маскировки на различение частотного сдвига тестировалось в ряде работ, но в таких работах были использованы простые тоны. Поэтому представляет интерес, как маскировка скажется на различении частотного сдвига в сложном спектре звукового сигнала. Вторая часть настоящего исследования посвящена оценке влияния маскирующих сигналов (маскеров) различной конфигурации на пороги различения частотного сдвига гребенчатого спектра шумового сигнала.

2. Цели и задачи исследования

Исходя из рассмотренных литературных данных, были сформулированы следующие цели и задачи исследования.

Фундаментальная проблема, в рамках которой выполнена настоящая работа: анализ сложных спектральных рисунков звукового сигнала в слуховой системе человека.

Цель настоящего исследования состояла в определении минимально детектируемых частотных изменений в узкополосном сигнале с гребенчатым спектром в оптимальных условиях и на фоне маскирующего шума.

Задачи исследования

Используя методы психоакустики, определить минимально различимые сдвиги фазы гребенчатого спектра узкополосного звукового сигнала при различных значениях параметров сигнала: плотность гребенчатой структуры, ширина гребней спектра, центральная частота спектра и интенсивности сигнала.

Оценить влияние маскирующего шума различной конфигурации на различение сдвига фазы гребенчатого спектра.

Описать полученные результаты качественной моделью, исходя из современных представлений о работе слуховой системы.

3. Литературный обзор

3.1. Слуховая улитка как основа частотной избирательности

Под частотной избирательностью подразумевается способность слуховой системы различать и отделять друг от друга частотные компоненты в сложном звуковом сигнале. Субстратом частотной избирательности в первую очередь служит базилярная мембрана и кортиева орган слуховой улитки, а реализуется частотная избирательность через работу двух механизмов – пассивного и активного. Частотно-избирательные свойства базилярной мембраны улитки – не единственный механизм, участвующий в частотном анализе звуковых сигналов. Помимо него возможно участие другого механизма, основанного на анализе временной последовательности импульсных разрядов в волокнах слухового нерва и вышележащих слуховых центров. Тем не менее, без учёта частотно-избирательных свойств улитки понимание механизмов частотного анализа в слуховой системе невозможно.

В 1961 г. Джордж фон Бекешти получил нобелевскую премию по физиологии за открытие физических механизмов стимуляции внутри слуховой улитки (for his discoveries of the physical mechanism of stimulation within the cochlea). Уже до Бекешти, в основном благодаря работам Гельмгольца, господствовало предположение, что именно улитка выступает в роли частотного анализатора, но Бекешти первым показал, как и за счёт чего происходит частотный анализ. С использованием световой микроскопии на мёртвой улитке было обнаружено, что тоновый звуковой сигнал вызывает волну, которая движется вдоль базилярной мембраны от основания улитки (овальное окно) к вершине (апексу) – бегущая волна (travelling wave). Распространяясь, бегущая волна достигает своего максимума в различных местах базилярной мембраны в зависимости от частоты предъявляемого тона и быстро затухает за зоной максимума. Локализация максимума есть функция частоты: высокочастотные колебания достигают пика ближе к основанию улитки (ближе к овальному окну), в то время как низкочастотные колебания имеют максимум ближе к вершине улитки (ближе к геликотреме) (Bekesy, 1960) (рисунок 1). Одним из ключевых свойств бегущей волны, за которое она и получила своё название, является увеличение отставания колебаний базилярной мембраны от

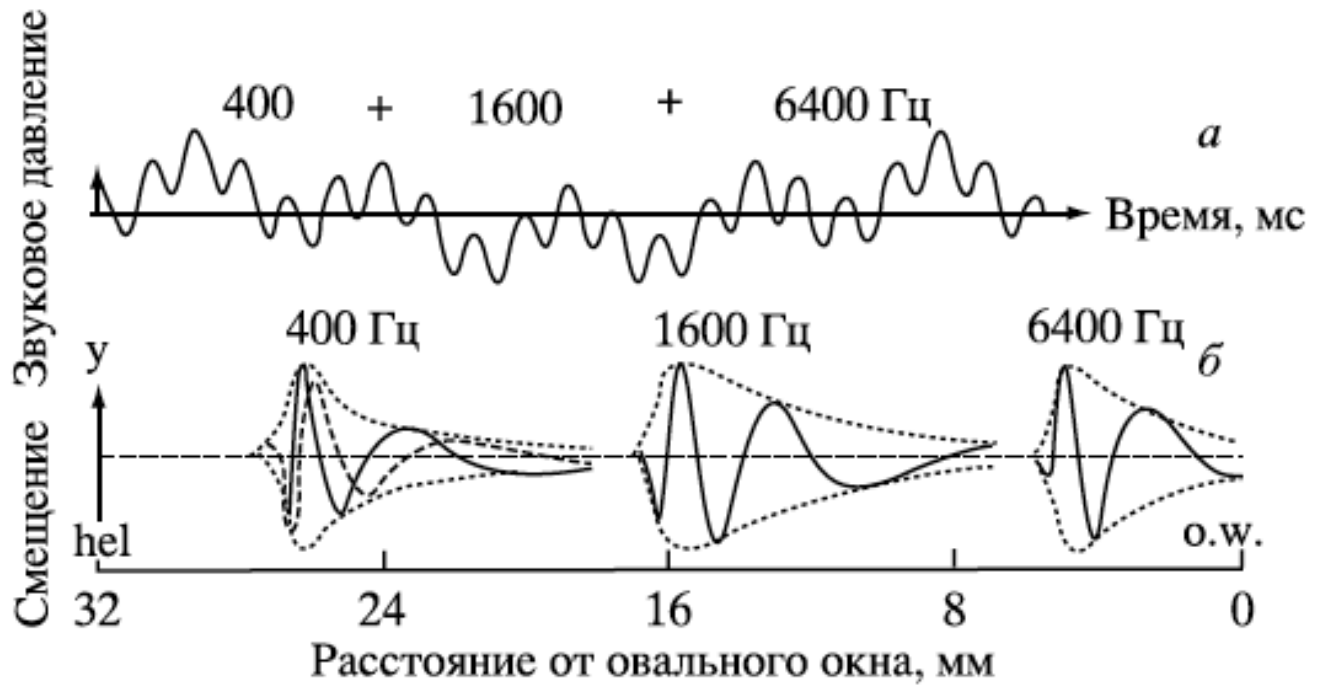


Рис. 1. Схематическая иллюстрация ответа базилярной мембраны (*a*) на три одновременно предъявляемых тона различной частоты (*б*). Бегущая волна достигает своего максимума в трёх различных местах, соответствующих характеристической частоте. В основе рисунок из работы (Fastl, Zwicker, 2007).

колебания стремени по мере удаления волны от основания улитки, т.е. для достижения дальних точек базилярной мембраны затрачивается больше времени.

Однако частотная настройка слуховой системы, полученная из экспериментов Бекеша, оказалась менее острой, чем ожидалось исходя из экспериментов по регистрации ответов отдельных волокон слухового нерва (Kiang et al., 1965; Rose et al., 1968). Поэтому было сделано предположение о наличии некоего дополнительного механизма между базилярной мембраной и слуховым нервом, который обострял бы частотную настройку. В 1971 г. Род, работая на живом саймири, продемонстрировал, что величина колебания базилярной мембраны проявляет компрессивную нелинейность как функцию от интенсивности стимула (Rhode, 1971). Эта нелинейность состоит в том, что изменение амплитуды вибрации базилярной мембраны не всегда пропорционально изменению уровня входного сигнала (отношение <1 дБ/дБ). Кроме того, Род показал, что нелинейность в улитке частотноспецифична и наблюдается только в области характеристической частоты для данной точки базилярной мембраны.

Позднее было открыто, что нелинейность и острая настройка обеспечиваются наружными волосковыми клетками, которые образуют так называемый активный механизм частотной селективности. Работа этого активного механизма обеспечивается тем, что длина наружных волосковых клеток увеличивается при их деполяризации и уменьшается при гиперполяризации. Изменение длины передаёт базилярной мембране дополнительное усилие, тем самым увеличивая амплитуду колебаний. При увеличении интенсивности звукового стимула наступает насыщение в наружных волосковых клетках, и механизм усиления перестаёт работать. При интенсивности звука порядка 100-110 дБ уровня звукового давления (УЗД) амплитуда колебаний базилярной мембраны и её частотная настройка становится такой же, как на неживом препарате (Ruggero et al., 1997). Таким образом, при низких интенсивностях звукового сигнала частотная настройка слуховой системы оказывается острее, чем при высоких интенсивностях.

Детали этого механизма до сих пор остаются предметом исследований. Неясно, что служит его основой: непосредственно движение (растяжение и сжатие) тел наружных волосковых клеток (Dallos et al., 2006) или изменение длины цилий волосковых клеток (вибрация базилярной мембраны отклоняет стереоцилии, что

приводит к изменению их потенциала и, следовательно, к изменению длины) (Martin et al., 2000), или работают оба механизма.

Работа активного механизма (наружных волосковых клеток) приводит к увеличению ответа базилярной мембраны, однако степень увеличения ответа зависит и от частоты, и от интенсивности тона (рисунок 2). Для частот ниже характеристической частоты нелинейность практически отсутствует: ответ растёт линейно с ростом уровня сигнала, т.е. увеличение интенсивности на 10 дБ даст увеличение ответа (размаха колебаний базилярной мембраны) также на 10 дБ. Однако для характеристической частоты и близких к ней частот ответ не будет линейным, благодаря чему динамический диапазон на характеристической частоте расширится в сторону низких интенсивностей, а на боковых частотах нет. Вследствие компрессивного эффекта обеспечивается широкий динамический диапазон слуха, порядка 120 дБ, который преобразуется в относительно небольшой диапазон возможного кодирования нейронами слуховой системы.

Стоит отметить, что большая часть работ по исследованию вибрации базилярной мембраны сделана на её коротком участке, соответствующем диапазону высоких частот. Попытки исследовать вибрации базилярной мембраны на более протяжённом участке немногочисленны (Rhode, Recio, 2000;). Ещё более трудоёмки работы по изучению вибрации у её вершины (Cooper, Rhode, 1995; Zinn et al., 2000). Такие работы показали, что механизмы анализа звука могут быть различны у основания и у вершины улитки (Темчин и др., 2012). В ряде работ с использованием метода регистрации импульсной активности волокон слухового нерва и оценки фазы деполяризации внутренних волосковых клеток было показано, что бегущая волна в улитке имеет две противоположенные фазы (полуволны). Одна полуволна, вызванная смещением стремени к барабанной перепонке, вызывает деполяризацию волокон, находящихся ближе к основанию улитки, вторая же полуволна с противоположенной фазой деполяризует волокна другой половины, прилежащей к вершине улитки. Приблизительно в середине улитки имеется переходная область, внутри которой резко меняются частотно-избирательные свойства волокон слухового нерва (Темчин и др., 2012).

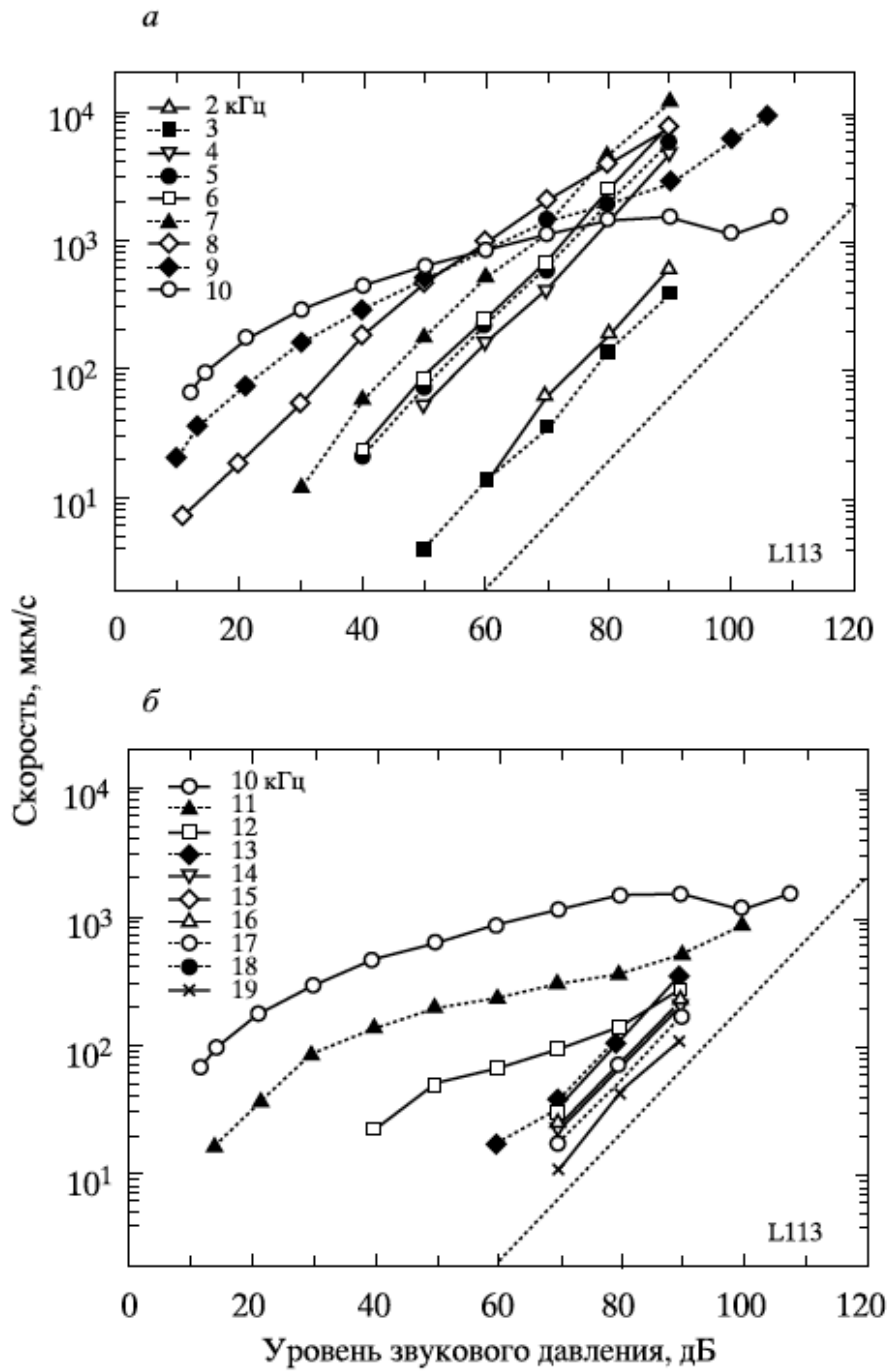


Рис. 2. Зависимость ответа базилярной мембраны шиншиллы от частоты и интенсивности тона, а – частота тона ниже характеристической частоты (10 кГц), б – частота тона выше характеристической частоты. Пунктирная прямая демонстрирует линейную зависимость (1 дБ/дБ). В основе рисунок из работы (Robles, Ruggero, 2001).

Из эффекта нелинейности ответа базилярной мембраны следует другой феномен, известный как двухтоновое подавление (*two-tone inhibition* или *two-tone suppression*). Впервые этот феномен был зарегистрирован в волокнах слухового нерва, когда ответ на один тон подавлялся добавлением второго тона (Sachs, Kiang, 1968). Данный эффект наблюдается как при регистрации волокон слухового нерва, так и при регистрации смещений базилярной мембраны. При высокой интенсивности подавляющего тона (супрессора) величина ответа базилярной мембраны на характеристической частоте для низких интенсивностей значительно падает, для высоких значений интенсивности ответ становится лишь несколько слабее. Таким образом, ответ базилярной мембраны на характеристической частоте принимает линейный вид в присутствии подавляющего тона. Величина эффекта двухтонового подавления зависит от отношения частот тона и супрессора. Эффект супрессии проявляется при частоте подавляющего тона как выше, так и ниже характеристической частоты. При частоте супрессора ниже характеристической частоты пороги подавления будут наиболее высокими (Robles, Ruggero, 2001) (рисунок 3).

Предположительно механизм двухтонового подавления имеет скорее механическую, а не нейрональную природу, и связан с взаимодействием базилярной мембраны и наружных волосковых клеток, т.е. с активным механизмом (Ruggero et al., 1992; Zhang et al., 2001). Однако результаты, полученные на базилярной мембране и при регистрации активности слухового нерва, несколько расходятся. Таким образом, подавление в слуховом нерве может отражать и более значительные взаимодействия (Geisler, Nuttall, 1997; Cai, Geisler, 1996).

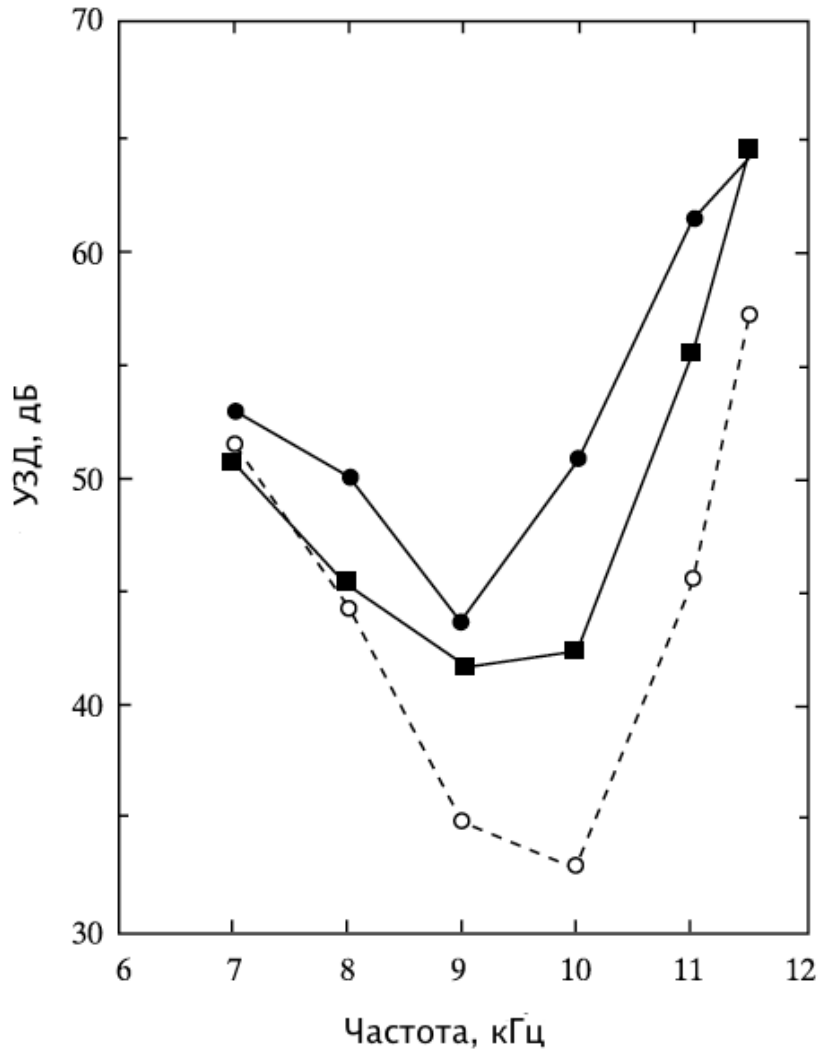


Рис. 3. Частотная специфичность эффекта двухтонового подавления. Кривые представляют ответы базилярной мембраны на одиночный тон 18,8 кГц (○) и на тот же тон, но в присутствии подавляющих тонов: 500 кГц (●) и 12 кГц (■). Интенсивность подавляющих тонов 70 дБ УЗД. В основе рисунок из работы (Robles, Ruggero, 2001).

3.2. Методы измерения частотной избирательности слуха

Данные по частотной избирательности слуха были получены с использованием многих методов: нейрофизиологических (построение нейронных настроечных кривых по ответам различных отделов слуховой системы), и психофизических, при которых необходимую информацию получают по ответам испытуемого на варьируемые звуковые сигналы. В последнем случае доминирующую роль играли методы с использованием эффекта маскировки.

3.2.1. Нейронные настроечные кривые

Одним из классических нейрофизиологических методов исследования частотной избирательности слуха является построение нейронных настроечных кривых. Для построения настроечной кривой используются короткие тоновые посылки различной частоты, интенсивность которых постепенно увеличивается до тех пор, пока не будет зарегистрирован ответ в волокне слухового нерва. Нейронные настроечные кривые имеют V-образную форму, где точка минимума - это наилучшая частота волокна, т.е. та частота, на которой волокно имеет наименьший порог. Этот метод является аналогом психофизических настроечных кривых, о котором будет сказано ниже.

3.2.2. Методы маскировки и концепция слуховых фильтров

Флетчер в 1940 году в эксперименте, ставшем сейчас классическим, измерял пороги различения тонального сигнала как функцию от ширины частотного спектра шумового маскира. Шум был всегда центрирован на частоте сигнала, и его спектральная плотность была постоянной, так что общая мощность шума увеличивалась с увеличением ширины спектральной полосы. С расширением спектральной полосы шума пороги обнаружения сигнала вначале увеличивались, но затем выходили на плато, и дальнейшее расширение полосы шума (и, как следствие, увеличение его интенсивности) не приводило к значительным изменениям в порогах (Fletcher, 1940) (рисунок 4). Исходя из этого, было сделано предположение, что периферическая слуховая система ведёт себя как набор перекрывающихся частотно-полосовых фильтров. Каждая часть

базиллярной мембраны отвечает на ограниченный диапазон частот, так что каждая точка мембраны соответствует определённому фильтру со своей центральной частотой. Ширина полосы, при которой пороги перестают увеличиваться, была названа критической полосой (critical band).

В качестве первой аппроксимации Флетчер принял, что форму слухового фильтра можно представить простой прямоугольной функцией с вертикальными сторонами и плоской вершиной. У такого фильтра все проходящие через него спектральные (частотные) компоненты будут давать одинаковые выходные сигналы, а все компоненты, не попадающие в полосу пропускания, будут отсекаются. Ширина фильтра в таком случае должна быть равна критической полосе. Чтобы оценить величину критической полосы, необходимо сделать два допущения: во-первых, только та часть шума, которая попадает в критическую полосу, оказывает маскирующий эффект и, во-вторых, когда достигается порог маскировки тона, мощность сигнала (P), делённая на мощность шума внутри критической полосы, есть величина постоянная (K). Следовательно, получаем следующее уравнение:

$$\frac{P}{W \cdot N_0} = K,$$

где N_0 – спектральная плотность, т.е. мощность шума в частотной полосе в 1 Гц (для белого шума значение N_0 не зависит от частоты), W – ширина критической полосы в Гц. Зная исходные значения N_0 и P , а также подобрав значение K , можно оценить ширину критической полосы W . Исходя из полученных данных, Флетчер предположил, что $K=1$, тогда величина критической полосы W составит P/N_0 . Такое соотношение было названо критическим отношением (critical ratio). Впоследствии приводилось другое значение K , приблизительно 0.4 (Scharf, 1970). Позже было показано, что K зависит от метода измерения порогов, а также то, что K изменяется с центральной частотой, и, следовательно, критическое отношение не даёт точной оценки критической полосы (Moore, 2013).

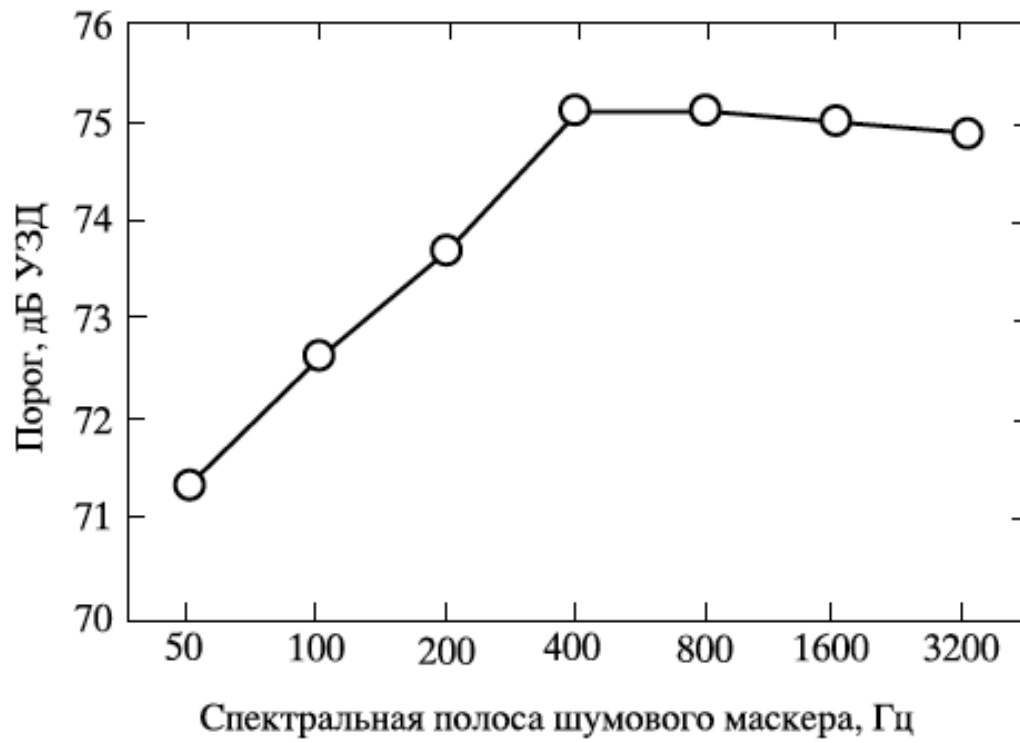


Рис. 4. Пороги обнаружения тонального сигнала 2000 Гц в зависимости от спектральной полосы шума маскиера. Шум центрирован на частоте сигнала. В основе рисунок из работы (Moore, 2013).

Но концепция прямоугольного фильтра оказалась полезной для описания ширины критической полосы фильтров в значениях эквивалентной прямоугольной ширины (ЭПШ, ERB (equivalent rectangular bandwidth)), т.е. ширины такого прямоугольного фильтра, который будет пропускать столько мощности входного шума, сколько и реальный слуховой фильтр. Таким образом, эквивалентная прямоугольная ширина равна:

$$B_{ER} = \int_0^{\infty} |W(f)|^2 df,$$

где B_{ER} - эквивалентная прямоугольная ширина, f - частота, $W(f)$ - передаточная функция фильтра.

Дальнейшее развитие концепция слуховых фильтров получила в виде спектральной модели (power spectrum model) (Patterson, Moore, 1986). Она основана на предположении, что слушатель, пытаясь обнаружить сигнал на фоне шума, использует слуховой фильтр с центральной частотой, соответствующей частоте сигнала, а на различение сигнала будут влиять только те компоненты шума, которые проходят через тот же фильтр. Из этого, как и предполагал Флетчер, следует, что порог для сигнала определяется количеством шума, проходящего через фильтр, т.е. порог соответствует определённому соотношению сигнал/маскер на выходе фильтра.

Для более точного описания частотной настройки слуховой системы был разработан метод, который является психофизическим эквивалентом нейронных настроечных кривых – психофизические настроечные кривые (рисунок 5) (Vogten, 1974). Испытуемому подавали тональный сигнал достаточно низкой громкости, порядка 10 дБ над порогом, с фиксированной частотой и определяли, какой уровень тонального маскира необходим, чтобы замаскировать сигнал. Такие измерения выполняли при разных частотах маскира. Поскольку при использовании тонального маскира возникали биения, что являлось дополнительной подсказкой, в более поздних экспериментах вместо тона применяли узкополосный шум (Dau et al., 1997). Так как сигнал имел низкую интенсивность, предполагалось, что он воздействует только на один слуховой фильтр. Таким образом, настроечные кривые отражают уровень маскира, который необходим для маскировки сигнала фиксированной громкости, как функцию от частоты маскира. Форму обычного физического фильтра определяют как зависимость сигнала на выходе фильтра от частоты при постоянном уровне входного сигнала. Если принять, что

слуховой фильтр линеен, то его форму можно получить, просто перевернув настроечную кривую.

Психофизические настроечные кривые неплохо совпадали с нейронными настроечными кривыми, но некоторые методологические трудности не позволяли говорить об их точности. Первая сложность была обусловлена эффектом прослушивания на боковых частотах (*off-frequency listening effect*). Вторая сложность состояла в том, что если психофизические настроечные кривые измеряются в парадигме одновременной маскировки, то ширина полосы пропускания фильтра может быть завышена вследствие латерального подавления (*lateral suppression*). Решением проблемы являлось измерение настроечных кривых в парадигме последовательной маскировки (Moore, 1978; Vogten, 1974).

Третья сложность состояла в том, что если masker и тест-сигнал близкой частоты, то они могут восприниматься как один сигнал, но отличающийся от «чистого» тест-сигнала (*confusion effect*). Этот эффект может привести к низкому значению уровня maskera на пороге (Moore, Glasberg, 1985; Neff, 1985) и, соответственно, к более острой форме настроечной кривой.

Тем не менее, психофизические настроечные кривые, полученные с использованием последовательной маскировки, более точно отражают частотную настройку слуховой системы, чем нейронные настроечные кривые слухового нерва (Yasin, Plack, 2003).

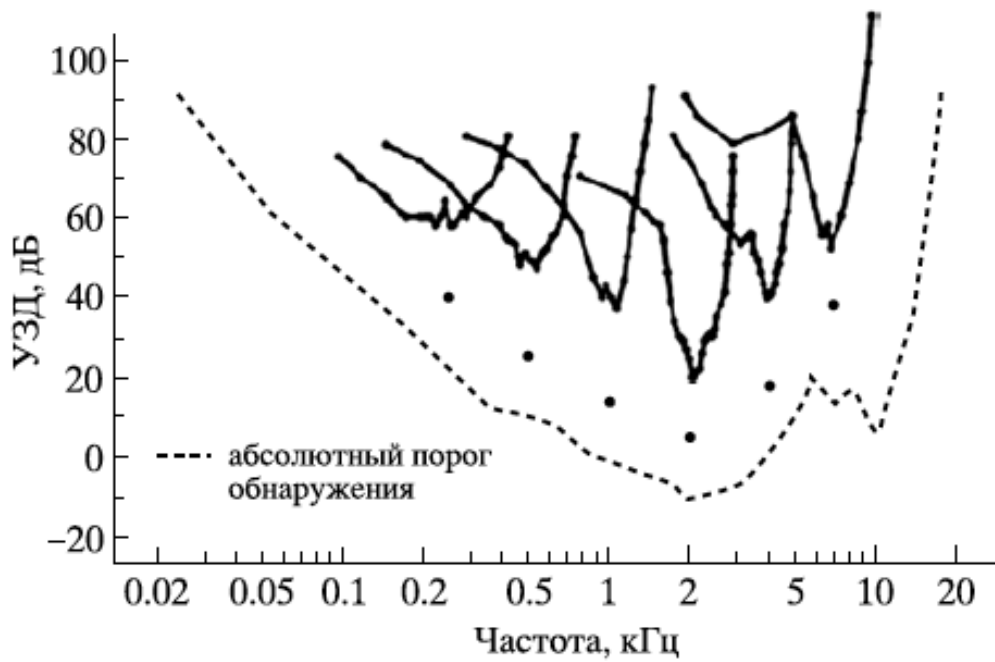


Рис. 5. Психофизические настроечные кривые, полученные при одновременной маскировке. Интенсивность тест-сигнала 10 дБ над порогом. Точка под пиком каждой из кривых отмечает частоту и интенсивность соответствующего тест-сигнала. В основе рисунок из работы (Vogten, 1974).

В качестве альтернативы для определения формы слуховых фильтров был предложен метод маскировки шумом со спектральным вырезом (notched-noise method) (Patterson, 1976). В таком методе сигнал с фиксированной частотой маскируется шумом, который имеет спектральный вырез, центрированный на частоте сигнала. Изменяя ширину спектрального выреза, определяли пороги обнаружения сигнала как функцию от ширины выреза (рисунок 6). На первом этапе использовали частотный вырез, симметричный относительно частоты сигнала, предполагая, что слуховые фильтры симметричны. Чем шире спектральный вырез, тем меньше мощности шума попадает в данный фильтр, и пороги обнаружения сигнала уменьшаются. Мощность шума, проходящая через слуховой фильтр, будет пропорционально площади под характеристикой фильтра в частотном диапазоне, покрываемом шумом. Дифференцируя функцию зависимости ширины спектрального выреза, можно получить характеристику фильтра (Moore, 2013).

Метод маскировки шумом со спектральным вырезом позволил по-новому оценить ширину критической полосы. До этого основной была Мюнхенская шкала критических полос (Zwicker, 1961), где эквивалентная прямоугольная полоса вычислялась по формуле:

$$B_M = 25 + 75 \cdot (1 + 1.4 \cdot F^2)^{0.69}$$

Новая шкала критических полос была названа Кембриджской (Glasberg, Moore, 1990) и рассчитывалась по следующей формуле:

$$B_C = 24.7 \cdot (4.37 \cdot F + 1),$$

где B_M и B_C – эквивалентная прямоугольная ширина в Мюнхенской и Кембриджской шкалах соответственно, в Гц (для Кембриджской шкалы сейчас чаще используется обозначение ERB_N), F – центральная частота полосы в кГц.

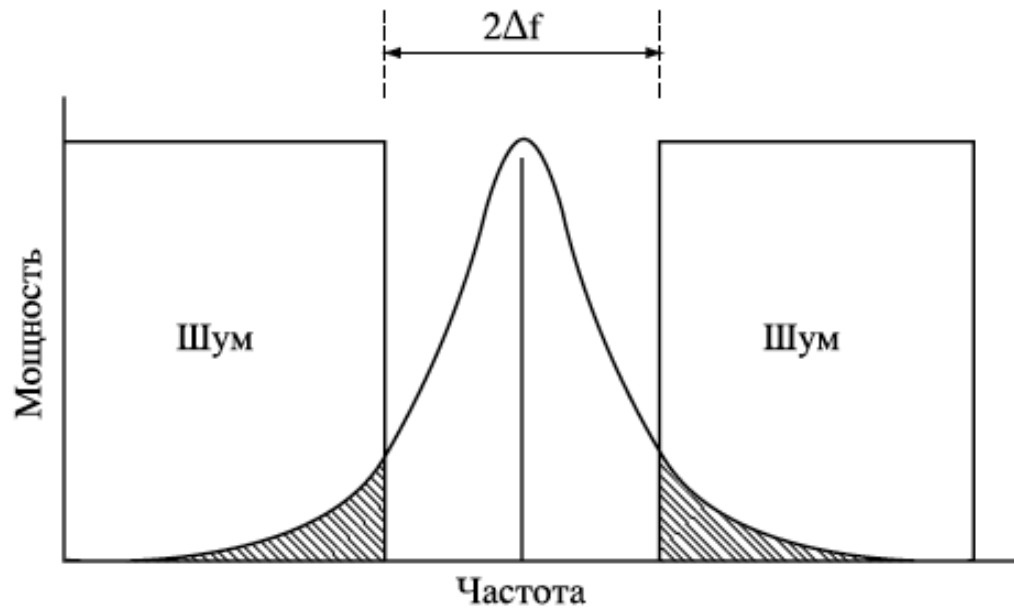


Рис. 6. Схема маскировки шумом со спектральным вырезом по (Patterson, 1976).

Кембриджские критические полосы более узкие, чем полученные ранее Мюнхенские; особенно заметно различие ниже частоты 500 Гц. Возможно, это связано с тем, что при вычислении Мюнхенских критических полос использовалось критическое отношение, которое даёт менее точные значения критических полос. На данный момент основной считается Кембриджская шкала.

Из уравнения получается, что ширина критической полосы приблизительно пропорциональна центральной частоте фильтра, т.е. относительная ширина критической полосы мало зависит от частоты. Например, для центральной частоты 1 кГц ширина критической полосы составляет 0.13 кГц (13% от центральной частоты), для частоты 2 кГц – 0.24 кГц (12%), для 4 кГц – 0.46 кГц (11%), и т.д. Для низких частот пропорциональность нарушается, например, для частоты 100 Гц, ЭПШ составляет около 35 Гц (35% от частоты) (рисунок 7). Обобщив, можно сделать вывод, что ширина слухового фильтра пропорциональна его центральной частоте на частотах приблизительно выше 500 Гц (Oxenham, Wojtczak, 2010).

Ещё один параметр, которым можно описать остроту частотной настройки слухового фильтра – добротность фильтра (Q).

$$Q = f_0 / \Delta f,$$

где f_0 – центральная частота, Δf – ширина фильтра. В психоакустике чаще используют эквивалентную прямоугольную добротность Q_{ERB} , которая описывается как отношение характеристической частоты к эквивалентной прямоугольной ширине этого фильтра.

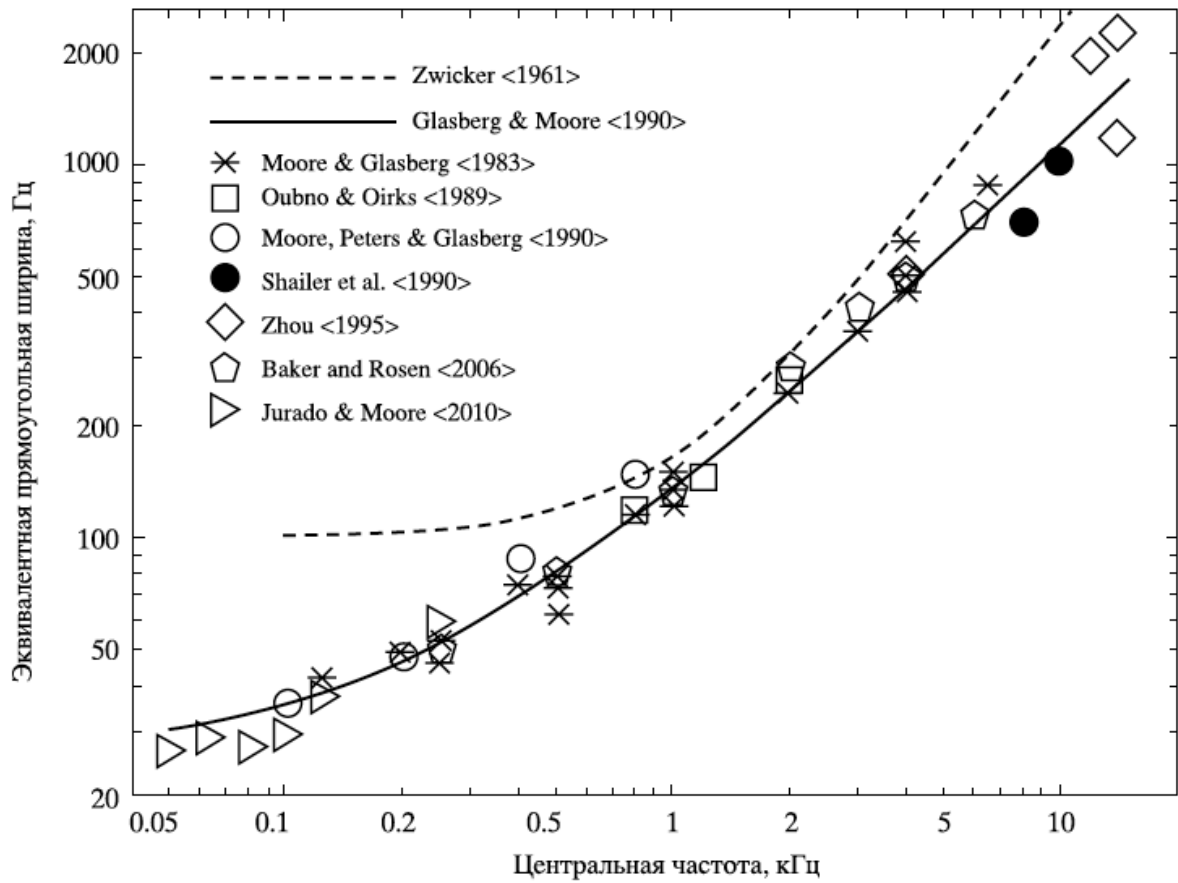


Рис. 7. Зависимость ЭПШ от частоты согласно результатам нескольких исследований. В основе рисунок из работы (Мооре, 2013).

В одной из работ Оксенхама и Шера 2003 г. при использовании парадигмы последовательной маскировки и сигналов очень низкой интенсивности (около 10 дБ над порогом) была получена альтернативная формула для Q_{ERB} :

$$Q_{ERB} = 11 \cdot F^{0.27},$$

где F – центральная частота в кГц. Исходя из этой формулы, эквивалентная прямоугольная ширина фильтра будет более узкой, чем предсказывалось раньше, особенно на высоких частотах. Например, для 1 кГц она составит 91 Гц, а для 10 кГц – 490 Гц. Вероятнее всего различия в полученных формулах объясняются разницей в условиях эксперимента. В работе (Oxenham, Sera, 2003) использование последовательной маскировки могло стать причиной отсутствия эффекта подавления; кроме того, при расчёте классической зависимости ERB от центральной частоты (Glasberg, Moore, 1990) использовались одновременная маскировка и средние значения интенсивности (порядка 50 дБ).

3.2.3. Форма слухового фильтра

Характеристику слухового фильтра можно получить, продифференцировав функцию отношения порогов к ширине спектрального выреза в шуме. Однако процедура дифференцирования приводит к тому, что результат в значительной мере зависит даже от небольших ошибок измерения. Поэтому обычно используется обратная процедура: подбирается такая гипотетическая функция, которая при интегрировании хорошо согласуется с полученными результатами по маскировке шумом со спектральным вырезом. Наиболее подходящей для этого оказалась функция скруглённой экспоненты (*roex* функция) (Patterson, Nimmo-Smith, 1980; Patterson et al., 1982):

$$W(g) = (1 + pg)e^{-pg},$$

где g – нормализованное отклонение частоты от центральной частоты f_c :

$$g = \frac{f - f_c}{f_c},$$

а параметр p определяет ширину и наклон характеристики фильтра: чем больше значение p , тем острее настроен фильтр. Эквивалентная прямоугольная ширина такого фильтра составит $4f_c/p$ (рис. 8).

В дальнейшем метод маскировки шумом со спектральным вырезом был модифицирован, что позволило оценить асимметрию слухового фильтра.

Изначально предполагалось, что слуховые фильтры линейны и их форма не изменяется в зависимости от уровня сигнала. Однако на самом деле характеристики слуховых фильтров становятся шире при повышении уровня сигнала, особенно в низкочастотной части. Это обусловлено работой двух взаимодополняющих механизмов частотного анализа: «пассивного», основанного на гидромеханических свойствах улитки, и «активного», основанного на электрокинетических свойствах наружных волосковых клеток.

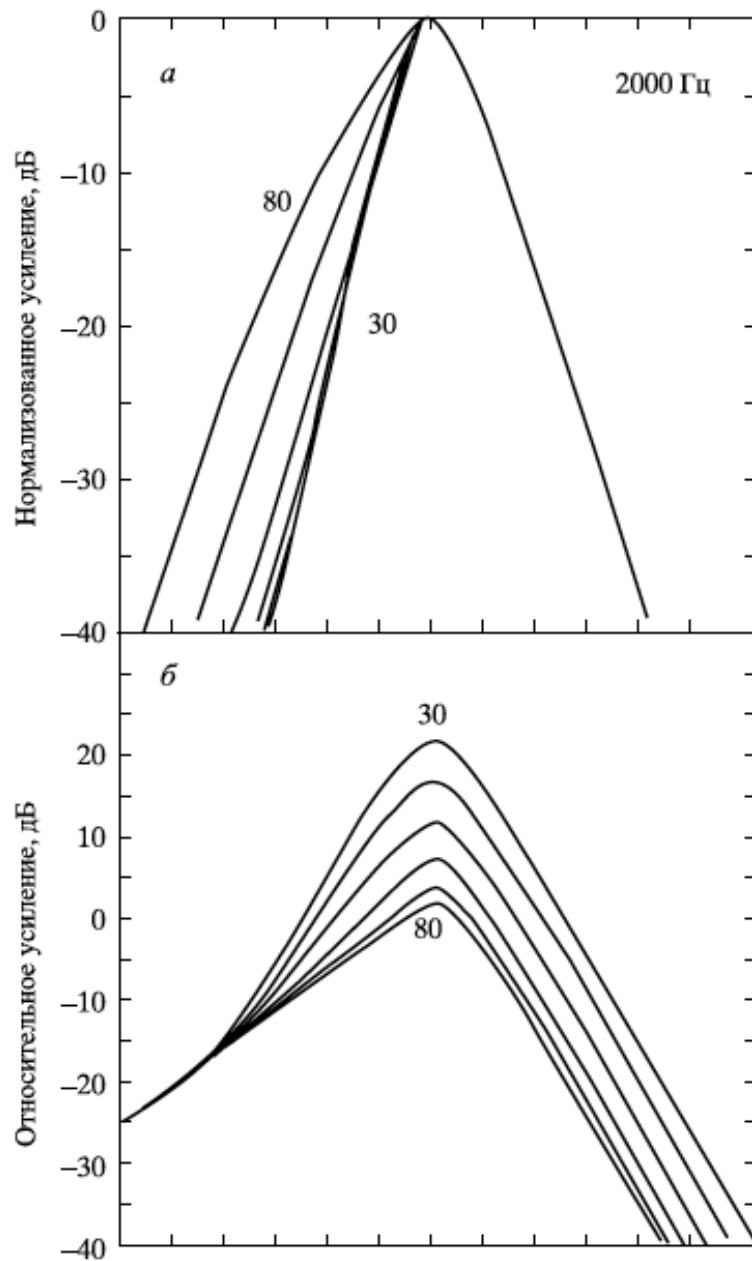


Рис.8. Форма слухового фильтра, центрированного на 2000 Гц, при варьировании интенсивности входного сигнала от 30 до 80 дБ УЗД, *а* - усиление на пике фильтра нормализованное, т.е. составляет 0 дБ для всех интенсивностей входного сигнала, *б* – усиление на пике фильтра составляет 0 дБ только для высоких интенсивностей входного сигнала. В основе рисунок из работы (Moore, 2013).

В модели слуховой системы как набора частотно-полосовых фильтров «пассивному» механизму соответствует основание характеристики фильтра, а «активный» отвечает за ширину пиковой части. При увеличении интенсивности сигнала происходит изменение соотношения между пиком и основанием характеристики слухового фильтра в пользу последнего (Glasberg, Moore, 2000; Lopez-Poveda, Meddis, 2001; Zhang et al., 2001; Unoki et al., 2006). При низкой интенсивности сигнала активный механизм вносит значительный вклад, что приводит к острой настройке слухового фильтра. Когда же происходит повышение интенсивности, коэффициент усиления активного механизма снижается, и пассивный механизм начинает играть главную роль. Таким образом, характеристика слухового фильтра расширяется с увеличением интенсивности.

Для описания слухового фильтра, форма которого зависит от интенсивности, также может быть использована *roex* функция, только в усложнённом варианте (рис.8). Высокочастотная сторона такого фильтра будет по-прежнему описываться одной функцией скруглённой экспоненты, так как не зависит от интенсивности сигнала:

$$W(g) = (1 + p_u g) e^{-p_u g},$$

где p_u - коэффициент для высокочастотной стороны фильтра. Низкочастотная сторона фильтра представлена суммой двух функций скруглённой экспоненты (Galsberg, Moore, 2000):

$$W(g) = ((G_{lin} \cdot (1 + p_l g) \exp(-p_l g) + (1 + t g) \exp(-t g))) / ((G_{lin} + 1)),$$

где G - параметр, зависимый от интенсивности сигнала, p определяет наклон фильтра у вершины, t определяет наклон основания фильтра.

Однако спектральная модель позволяет оценивать работу слуховых фильтров только в частотной области и не затрагивает временные характеристики. Она не позволяет учитывать временные факторы, например, колебания огибающей (*envelope fluctuations*). Для того чтобы охарактеризовать ответ слуховых фильтров во времени был предложен метод обратной корреляции (*reverse correlation, revcor*), который использовали для получения импульсной характеристики ответа слухового нерва в ответ на белый шум. Оказалось, что ответ может быть аппроксимирован математической функцией, известной как *gamma tone function*, на основе которой была

сделана модель gamma tone filterbank (Patterson et al., 1995). Такая модель в сочетании с другими моделями формирует количественную модель слухового восприятия. Импульсный ответ такого фильтра описывается следующим уравнением:

$$g(t) = at^{n-1} \exp(-2\pi b \text{ERB}(f_c)t) \cos(2\pi f_c t + \theta),$$

где f_c – центральная частота фильтра, $\text{ERB}(f_c)$ – эквивалентная прямоугольная ширина данного фильтра, a , b , θ – параметры. Такая модель широко используется при моделировании слуховых процессов, но в своем изначальном представлении линейна и не отражает зависимости от интенсивности. Соответственно функция была модифицирована добавлением параметров, которые отражали частотный сдвиг (frequency glide) в импульсном ответе фильтра (Irino, Patterson, 1997). Импульсный ответ такого фильтра описывается функцией:

$$g(t) = at^{n-1} \exp(-2\pi b \text{ERB}(f_r)t) \cos(2\pi f_r t + c \ln t + \theta),$$

где c – параметр, отражающий зависимость ответа фильтра от интенсивности сигнала, f_r – центральная частота фильтра, которая варьируется с параметром c . Выражение $c \ln t$ вводит в систему частотный сдвиг импульсной характеристики фильтра (gammachirp). Такой фильтр обладает многими характеристиками, присущими реальным слуховым фильтрам: его низкочастотная сторона изменяется с повышением интенсивности сигнала, ЭПШ увеличивается с увеличением интенсивности, вершина фильтра меняет своё положение, что хорошо согласуется со сдвигом пика ответа на базилярной мембране при увеличении уровня звукового сигнала (Unoki et al., 2006; Oxenham, Wojtczak, 2010).

Ещё один метод, который использовался для оценки формы слуховых фильтров - это маскировка шумом со спектральными пиками (rippled noise) (Houtgast, 1977; Pick, 1980). Один из способов генерации такого шума - добавление к белому шуму его копии, задержанной на время T . Получаемый спектр имеет пики, расположенные на шкале частот с интервалами $1/T$. Значение T подбирается таким образом, чтобы тональный сигнал фиксированной частоты попадал на спектральный пик или провал, пороги маскировки измеряются соответственно при различной плотности спектральных пиков. Получаемая таким образом форма слуховых фильтров похожа на фильтры,

рассчитанные с использованием маскировки шумом со спектральным вырезом, хотя и имеет тенденцию к некоторому расширению и уплощению вершины фильтра.

3.2.4. Паттерны возбуждения и паттерны маскировки

Мур и Гласберг (Moore, Glasberg, 1983) предложили способ предсказания формы паттерна возбуждения, используя концепцию слуховых фильтров. Паттерном возбуждения может считаться зависимость сигнала на выходе слухового фильтра от центральной частоты фильтра. Трактовка паттернов возбуждения состоит в том, что они отражают активность (возбуждение), создаваемую тест-сигналом на базилярной мембране. Эта идея проиллюстрирована на рисунок 9. На рисунке *а*) показана группа слуховых фильтров, которая отвечает на тональный тест-сигнал, в данном примере с частотой 1 кГц. Каждый фильтр в модели предполагается симметричным, но полоса пропускания фильтра зависит от его центральной частоты. Пунктирной линией показан сигнал частотой 1кГц, для которого необходимо рассчитать паттерн возбуждения. На рисунке *б* показан полученный паттерн возбуждения. Ответ самого низкочастотного фильтра составляет -40 дБ (точка (а) на *а*). На графике паттерна возбуждения (точка (а) на *б*) будет иметь по ординате значение -40 дБ, а по абсциссе значение центральной частоты низкочастотного фильтра. Таким же образом получены уровни выходного сигнала для остальных точек (а, b, c, d, e). Точка (с) будет соответствовать точке максимального возбуждения. Если принять допущение, что в различении сигнала принимает участие только один слуховой фильтр, характеристическая частота которого соответствует частоте сигнала, то паттерн возбуждения может быть получен путём математической свёртки формы слухового фильтра с формой входного сигнала.

Альтернативный вариант маскировочного способа оценки частотной избирательности – построение паттернов маскировки. Паттерн маскировки представляет собой функцию, которая связывает уровень сигнала на пороге маскировки с частотой сигнала. Для того чтобы её получить, необходимо поменять местами маскер и сигнал: если в классических экспериментах с маскировкой частота сигнала была постоянной, а частота маскера изменялась, то в экспериментах с получением паттернов маскировки частота маскера остаётся постоянной, а варьируется частота сигнала. Форма паттерна маскировки, так же как и форма слухового фильтра, имеет колоколообразную форму, но

от интенсивности зависит высокочастотная сторона паттерна маскировки. С повышением интенсивности маскира она становится более пологой. Например, если уровень маскира увеличивается на 10 дБ, то пороги маскировки для сигнала высокой частоты поднимутся больше, чем на 10 дБ. Такая нелинейность для порогов на частотах выше частоты маскира известна как распространение маскировки в высокочастотную сторону (*upward spread of masking*) (Moore, 2013).

Трактовка паттернов маскировки состоит в том, что они отражают активность (возбуждение), создаваемую маскером на базилярной мембране.

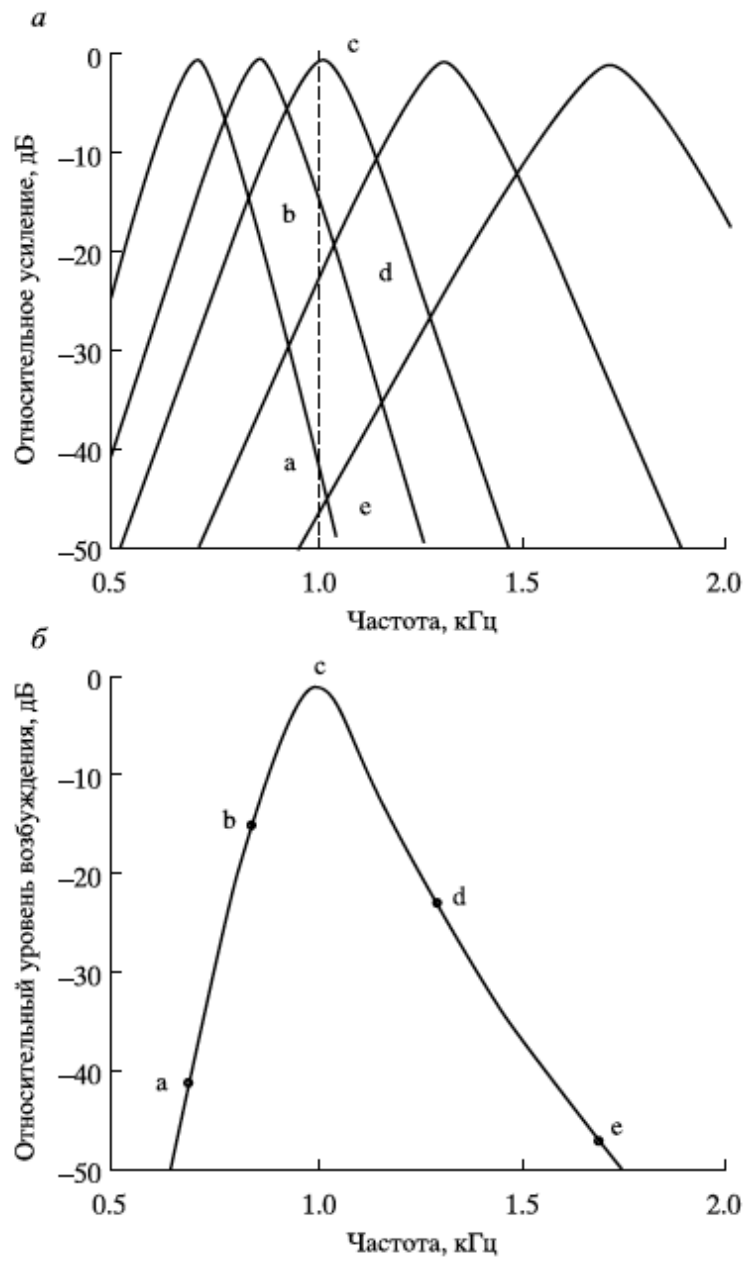


Рис. 9. Модель предсказания формы паттерна возбуждения по (Moore, Glasberg, 1983).

Пояснения в тексте.

3.3. Оценка частотной избирательности слуха с использованием сложных сигналов

Ещё один способ измерения частотной избирательности слуха – использование прямых методов, т.е. без оценки остроты настройки отдельных частотно-избирательных фильтров. Такие методы позволяют измерить способность слуховой системы к различению сложных спектральных рисунков звукового сигнала. Для прямого измерения частотной избирательности необходимо использовать тест-сигнал со сложным (дробным) спектральным рисунком. Максимальная различаемая дробность спектрального рисунка такого сигнала будет мерой частотной избирательности слуха (спектральной разрешающей способности) слуха.

Одним из первых шагов в этом направлении был ряд исследований (Green, 1983; 1992; Green et al., 1987), где разрабатывалась идея анализа «слуховых профилей». В этих работах использовался сигнал, состоящий из набора чистых тонов, которые были равномерно распределены на логарифмической шкале частот. Меняя интенсивность отдельных тонов, можно выстроить некоторый спектральный рисунок, а задачей испытуемого станет отличить равномерный спектральный рисунок от неравномерного. Было установлено, что испытуемый способен различать спектры, если среднеквадратичное отклонение спектрального рисунка от среднего уровня составляет - 24.5 дБ (т.е. разница между спектральными пиками по амплитуде приблизительно 6%). Но в этих экспериментах применялись довольно большие интервалы между частотами, которые превышали величину критической полосы, что не позволяло оценить частотную избирательность.

Другой тип сигнала, который стал широко применяться в исследовании спектральной разрешающей способности слуха - шум с гребенчатым спектром, т.е. спектр, в пределах частотной полосы которого содержится набор чередующихся максимумов и минимумов спектральной плотности. Этот тип сигнала использовался в ряде работ как маскер, кроме того он использовался в исследованиях восприятия высоты сложных звуков (Yost, 1982, 1996). Такой сигнал является удобной моделью натуральных звуков, которые, как правило, обладают сложными дробными спектрами. Однако, в отличие от множества натуральных звуков, такой искусственный сигнал может быть однозначно охарактеризован набором точных физических параметров.

Чтобы установить, в каких случаях спектральные рисунки различаются слуховой системой, был предложен тест реверсии фазы гребней спектра (Попов, Супин, 1984). Он

состоит в том, что шум с гребенчатым спектром в некоторый момент времени заменяется на шум с такими же параметрами, но с противоположенным положением максимумов и минимумов спектральной плотности на частотной шкале. Соответственно, если испытуемый способен различить гребенчатую структуру спектра, то в момент переключения он услышит кратковременное изменение тембра звука; если же спектральная структура не различима, то в момент переключения испытуемый не заметит никаких изменений, так как все остальные параметры, кроме положения спектральных пиков, до и после переключения одинаковы.

Этот метод получил развитие в двух направлениях:

В первом случае используется широкополосный шум, охватывающий весь частотный диапазон слуха, а гребни спектра либо имеют равную ширину на частотной шкале, либо частотно – пропорциональны (рисунок 10).

Во втором случае используется узкополосный гребенчатый спектр, где интервалы между гребнями спектра частотно-пропорциональны (такие гребни будут иметь одинаковую ширину на логарифмической шкале частот) (рисунок 11).

Целью первого экспериментального направления стал поиск корреляций между различением гребенчатой структуры спектра и различением речевых сигналов у здоровых испытуемых, у пациентов с нарушениями слуха, а также у пациентов, использующих кохлеарные импланты. Различение сложного спектрального рисунка является одним из важнейших условий восприятия речи. Например, способность различать спектральные пики, связанные с первыми двумя или тремя формантами, имеет значение для идентификации гласных звуков. Результаты речевых тестов показали, что спектральная разрешающая способность - один из факторов, ограничивающих различение речи у носителей кохлеарных имплантов.

Была выявлена зависимость между различением гласных звуков и различением сложной гребенчатой структуры спектра у испытуемых с нормальным слухом, пациентов с нарушениями слуха и пациентов, использующих кохлеарный имплант: чем лучше различение гребенчатой структуры спектра, тем выше точность распознавания звуков речи. Для нормального распознавания речи без помех разрешающая способность должна составлять примерно 4 пика на октаву, а при разрешающей способности в 1-2 пика на октаву распознавание речи резко ухудшалось.

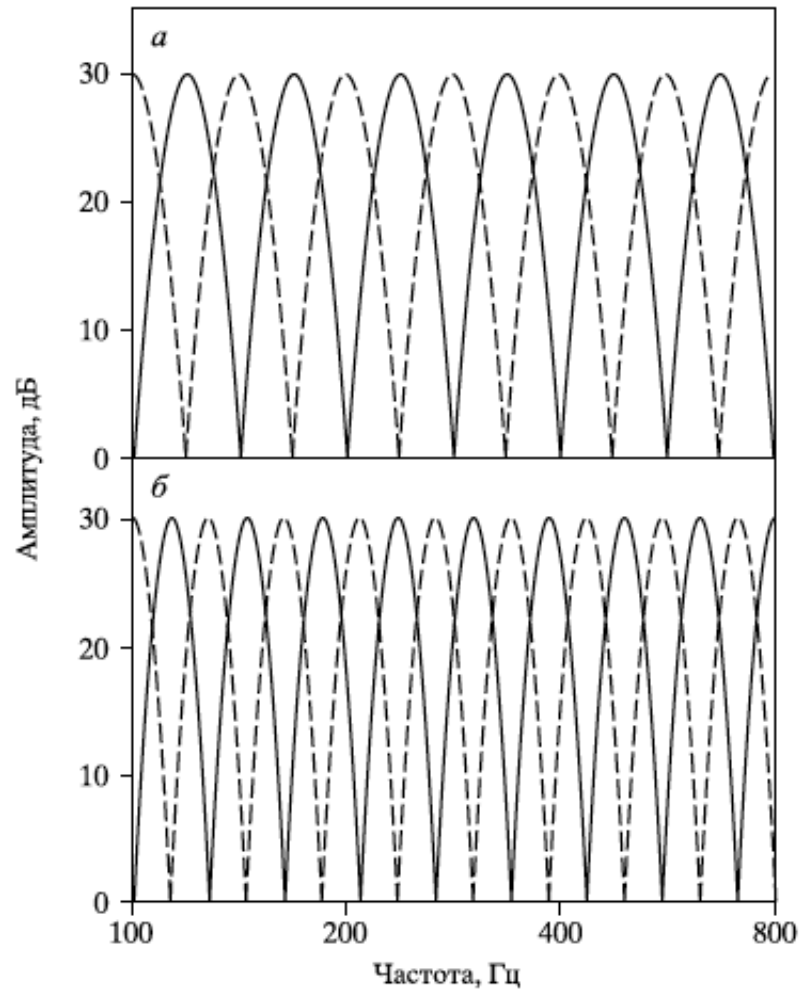


Рис.10. Широкополосный гребенчатый спектр разной плотности (*a* – 2 цикл/октаву, *б* – 2, 828 цикл/октаву) с прямым (—) и обратным (---) положением гребней. В основе рисунок из работы (Won et al., 2007).

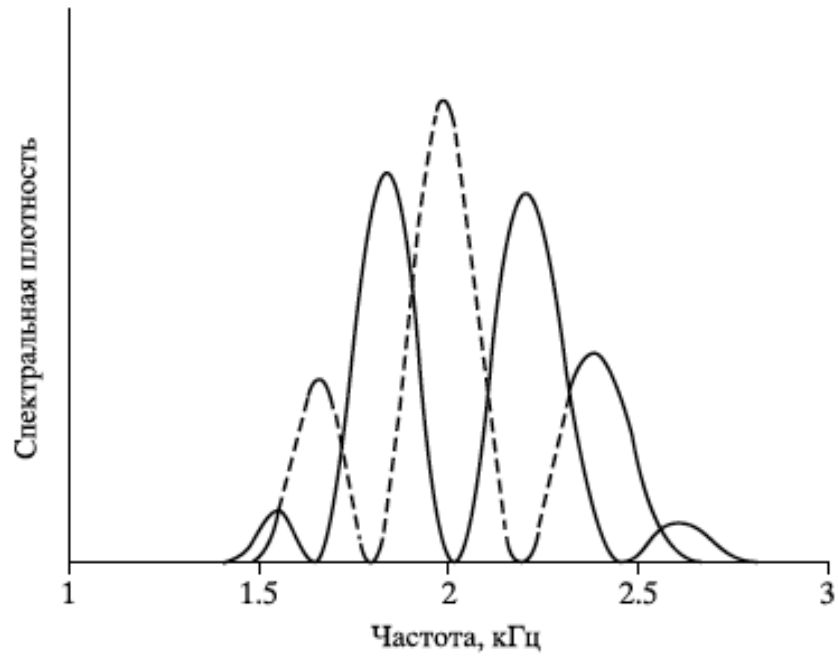


Рис.11. Узкополосный гребенчатый спектр плотностью 5 цикл/октаву, центрированный на 2 кГц, с прямым и обратным положением гребней спектра.

Увеличение числа каналов в импланте также приводило к улучшению различения у испытуемых без нарушений слуха, у которых моделировалось использование импланта: у них улучшение наблюдалось при увеличении каналов до 16, а у испытуемых с нарушением слуха и с наличием реального импланта - при увеличении до 4-6 (Henry, Turner, 2003; 2005). В последующих работах было обнаружено, что пороги спектрального различения в шуме хорошо коррелируют с порогами восприятия речи (speech reception threshold) в шуме, что согласуется с идеей о важности спектрального различения, в особенности для понимания речи в условиях помех (Won et al., 2007). Но при анализе различных конфигураций кохлеарных имплантов было обнаружено, что одна из них (tripolar electrode configuration) приводит к улучшению различения гребенчатой структуры, но при этом улучшение восприятия речи не столь заметно (Berenstein et al., 2008, Drennan et al., 2010). Исходя из этого, возникает вопрос, действительно ли различение гребенчатой структуры будет отражать спектральное различение (McKay et al., 2009). Соответственно была протестирована связь между различением гребенчатой структуры спектра и настроечными кривыми (spatial tuning curve). Если различение гребней действительно отражает спектральное различение, то пороги должны коррелировать с шириной настроечной кривой (Anderson et al., 2011). Пороги различения гребенчатой структуры спектра у пациентов с кохлеарными имплантами составили от 0.41 до 4.27 цикл/окт (количество гребней на октаву), в среднем 1.68 цикл/окт. Такой же широкий разброс данных наблюдался и при измерении ширины настроечной кривой на тех же испытуемых. Была обнаружена значительная корреляция между шириной настроечной кривой и различением спектральной структуры: чем шире настроечная кривая, тем меньшую плотность гребней в спектре способен различить испытуемый. В этой же работе был использован узкополосный гребенчатый спектр, шириной в октаву, где центральная частота соответствовала центральной частоте фильтра речевого процессора и для которого была измерена настроечная кривая. При этом также была обнаружена корреляция между различением гребенчатой структуры и шириной настроечной кривой, в данном случае корреляция была значительнее, а также была выявлена корреляция между различением гребенчатого спектра и различением речи (Anderson et al., 2011), но не столь значительная, как в предыдущих работах.

Таким образом, тест на различение гребенчатой структуры спектра может обеспечить измерение спектрального различения у пациентов с кохлеарными имплантами и при этом являться менее время затратным в сравнении с другими тестами.

Ряд исследователей всё же полагают, что тестирование спектральной разрешающей способности при помощи теста реверсии фазы гребней спектра имеет особенности, которые могут затруднять интерпретацию полученных результатов. Такие трудности преимущественно связаны с вопросом, не происходит ли различения спектров на основе скачков интенсивности. Поэтому в качестве альтернативного варианта теста предлагается тест, основанный на обнаружении возникающей спектрально временной гребенчатой модуляции (*spectral-temporally modulated ripple test*). В таком тесте задача испытуемого – отличить чистый шумовой сигнал от сигнала с гребенчатой структурой спектра различной плотности, в котором происходит не реверсия фазы гребней спектра, а динамическое перемещение гребней внутри спектральной огибающей (Aronoff, Landsberger, 2013).

В одной из последних работ широкополосный гребенчатый спектр использовался для выявления оптимальных стратегий работы различных кохлеарных имплантов (Won et al., 2014).

Второе направление получило своё развитие в работах по изучению зависимости частотной разрешающей способности от параметров гребенчатого спектра на испытуемых без нарушений слуха. В таких экспериментах, как уже говорилось ранее, преимущественно использовался узкополосный гребенчатый спектр с частотно пропорциональной шириной гребней спектра.

В первую очередь тестировалась максимальная различимая плотность гребенчатого спектра (Supin et al., 1994, 1998). Было показано, что максимальная различимая плотность варьирует с центральной частотой спектра: при частоте от 500 Гц до 1 кГц максимальная различимая плотность составляла от 7.6 отн.ед. (5 цикл/окт) до 12 отн.ед. (8.4 цикл/окт) ($D_{отн} = D_{окт}/0.7$, где $D_{отн}$ - плотность гребней спектра в относительных единицах и $D_{окт}$ – плотность в гребнях на октаву (цикл/окт)). В интервале от 1 кГц до 8 кГц порог различения составлял от 12 отн.ед. (8.4 цикл/окт) до 16 отн.ед. (11 цикл/окт). Порог различения мало зависел от ширины спектральной полосы шума. Были протестированы полосы от 0.5 до 4 октав, небольшая тенденция в снижении различения при расширении спектральной полосы наблюдалась для

центральных частот спектра 2 и 4 кГц. Была также проанализирована зависимость различения гребенчатой структуры спектра от глубины модуляции спектрального рисунка (т.е. чувствительность к контрасту) (Супин и др., 1999; Supin et al., 1994, 1998). При низкой плотности спектрального рисунка порог спектрального контраста составлял около 20% спектральной мощности (10% по амплитуде), при повышении плотности гребней спектра порог спектрального контраста повышался. Т.е. чем больше была плотность гребней спектра, тем большая глубина модуляции спектра была необходима для её различения (рисунок спектра должен был быть более контрастным). Такую зависимость можно объяснить моделью, согласно которой контраст внутреннего спектра (паттерна возбуждения) уменьшается с увеличением плотности спектра звукового сигнала. Следовательно, контраст входного спектра звукового стимула должен быть выше, чтобы контраст внутреннего спектра оказался надпороговым и доступным для различения. Такая модель позволила оценить минимальное изменение контраста на выходе слухового фильтра, необходимое для различения гребенчатой структуры. Эта величина составила приблизительно 1.8 дБ.

Зная значение частотной разрешающей способности и минимально различимый контраст спектра на выходе фильтров, можно сравнить экспериментальные данные по частотной разрешающей способности со значением, которое может быть предсказано исходя из классической модели частотной избирательности, основанной на данных из экспериментов по маскировке.

Используя свёртку формы слухового фильтра, представленную гоех функцией, и формы спектрального рисунка сигнала, можно рассчитать выходной сигнал. Такую процедуру необходимо провести для сигналов с разной фазой гребней спектра. При минимальном детектируемом изменении контраста, т.е. максимально различимой плотности, отношение выходных сигналов с разной фазой гребней спектра должно составить 1.8 дБ:

$$\partial I = 10 \cdot \log \frac{(1+4\pi^2 D^2/P^2)^2 + \cos 2\pi D\theta}{(1+4\pi^2 D^2/p^2)^2 + \cos 2\pi D(\theta+0.5)},$$

где ∂I – отношение интенсивностей выходных сигналов (1.8 дБ на пороге), D – плотность гребней спектра, p – параметр слухового фильтра, θ – параметр, определяющий фазу гребней спектра. Преобразуя данную формулу получим, что максимально различимая плотность гребней спектра составит $D = p/5.65$.

Эта предельная плотность спектральных гребней определяет частотную разрешающую способность слуха (R). Эквивалентная прямоугольная ширина слухового фильтра, исходя из данных маскировки, составляет: $ERB = 4F_0/p$, где F_0 - центральная частота фильтра. Таким образом: $ERB=0.71F_0/R$, а классическая формула, полученная Муром и Гласбергом: $ERB=24.7(4.37F+1)$.

Исходя из этого, можно предсказать, какой должна быть частотная разрешающая способность на основе классической модели, и далее сравнить с экспериментальными данными. Оказалось, что даже минимальное значение частотной разрешающей способности, полученное экспериментальным путём, вдвое превосходит значение, предсказанное моделью: классическая модель даёт значения максимально различимой плотности порядка 6-8 отн.ед. (4-5.6 цикл/окт), а экспериментальные данные в среднем 12 отн.ед.(8.4 цикл/окт) (рисунок 12) (расчёты подробнее в работе (Supin et al., 1997).

Такое различие может быть объяснено несколькими гипотезами. Можно предположить, что высокое значение частотной разрешающей способности отражает дополнительную настройку слуховых фильтров за счёт нелинейных механизмов (такие механизмы не учитываются в классической модели). Например, латеральное подавление по некоторым данным может способствовать увеличению контраста спектра (Evans, 1992). Латеральное подавление описано на многих уровнях слуховой системы: от кохлеарных ядер (Rhode, Greenberg, 1994) до слуховой коры мозга (Shamman et al., 1995).

Следующим этапом исследований было тестирование влияния интенсивности звука на различение гребенчатой структуры спектра. Как уже говорилось ранее, острота частотной настройки слуховых фильтров зависит от интенсивности сигнала: при увеличении интенсивности слуховые фильтры расширяются вследствие падения усиления более остро настроенного активного механизма и увеличения относительного веса менее остро настроенного пассивного механизма (Glasberg, Moore, 2000). Исходя из этого, можно было бы предположить, что частотная разрешающая способность также упадёт при увеличении интенсивности сигнала.

Однако эксперименты показали, что этого не происходит. При увеличении интенсивности до 90 дБ над порогом не происходило изменения частотной разрешающей способности (Супин и др., 2002). Объяснить это можно тем, что в зависимости от интенсивности звука меняется именно соотношение пиковой части частотной характеристики (активный механизм) и её основания (пассивный механизм).

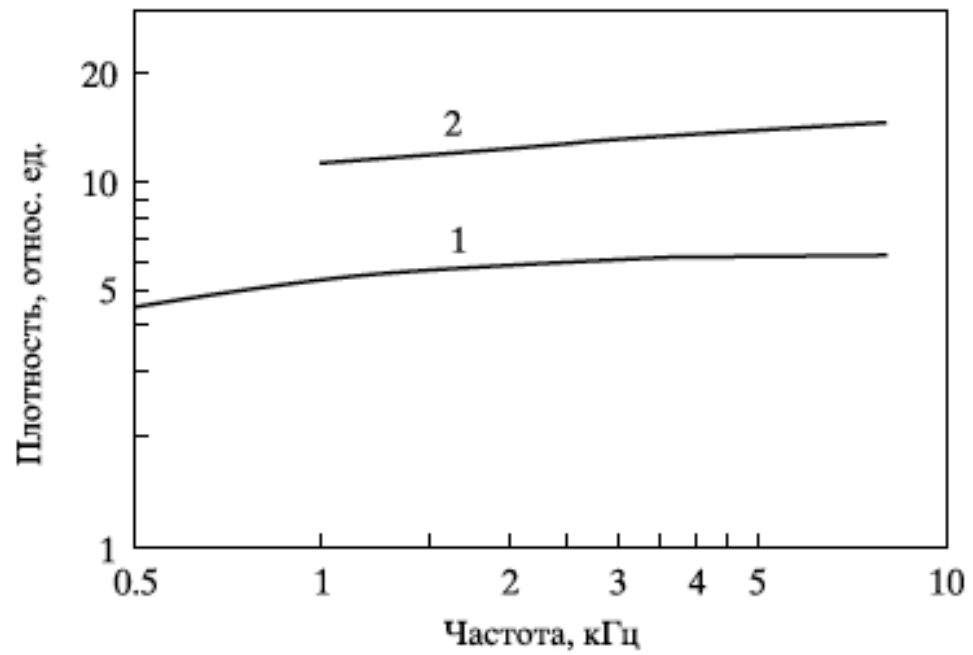


Рис.12. Сравнение значений ЧРС классической модели (1) и экспериментальных данных (2). Пояснения в тексте. В основе рисунок из работы (Supin et al., 1997).

До тех пор пока вклад активного механизма будет превышать вклад пассивного, а такое условие выполняется до достаточно больших значений интенсивности, форма пиковой части характеристики фильтра остаётся практически неизменной. Именно пиковая часть характеристики передаёт подавляющую часть мощности входного сигнала, а основание передаёт лишь несколько процентов мощности.

Теоретически отличия между результатами исследований частотной избирательности слуха, полученные с использованием сигналов с гребенчатым спектром и классическими методами маскировки, можно было бы объяснить временным анализом. Возможно, анализ гребенчатой структуры осуществляется в слуховой системе не частотно настроенными слуховыми фильтрами, а благодаря механизму временного анализа. Действительно, в ряде работ рассматривается гипотеза, что в анализе широкополосных шумов с равномерным распределением гребней спектра на частотной шкале основную роль играет временной анализ (Yost, 1996; Krumbholz et al., 2001). Такой шум не имеет выраженной временной структуры, но у него есть скрытая временная структура, которая проявляется в его автокоррелограмме. Если шум был получен сложением белого шума с его задержанной копией, где задержка равна ∂t , то в автокоррелограмме будет пик, соответствующий этой задержке: $\partial t = 1/\partial f$, где ∂f – расстояние между гребнями. Предполагается, что слуховая система способна вычислить автокорреляционную функцию и детектировать пик соответствующей задержки. В случае узкополосного шума с частотно пропорциональным расположением гребней на частотной шкале, автокорреляционная функция будет иметь другой вид. Реверсия фазы гребней спектра не будет вызывать изменений в «макро» структуре функции, а приведёт только к сдвигу пика, который составит $1/f_0$, где f_0 – центральная частота спектра. Таким образом, сдвиг будет зависеть от центральной частоты полосы спектра, а не от расстояния между соседними гребнями, в то время как фактором, ограничивающим частотную разрешающую способность, является частотный интервал между соседними гребнями. Кроме того, возникающая временная задержка в случае высокочастотного сигнала при широкополосном гребенчатом спектре лежит на границе временного различения слуховой системой, а при узкополосном спектре далеко за пределами временной разрешающей способности. Например, при частоте 8 кГц и плотности гребней 4 отн.ед. расстояние между гребнями широкополосного шума составит 2 кГц, а задержка составит 5 мс. При тех же условиях, но в случае узкополосного спектра с

частотно пропорциональным расположением гребней спектра, сдвиг во времени в автокорреляционной функции составит 62.5 мкс (Supin et al., 1997; Супин, 2003).

3.4. Частотные дифференциальные пороги

Эффективными показателями остроты частотной настройки являются частотные дифференциальные пороги. Дифференциальный порог по частоте – это наименьшее воспринимаемое различие между двумя частотами звука (Δf) выраженное, как правило, в герцах. Частотные дифференциальные пороги можно назвать связующим звеном между частотной избирательностью (frequency selectivity) и частотным различием (frequency discrimination). Первое относится к способности различить частотные компоненты в комплексном звуке, второе же подразумевает способность различать частотные изменения во времени (Moore, 2013).

Существуют два основных способа измерения частотных дифференциальных порогов. Первый основан на предъявлении испытуемому двух следующих друг за другом тоновых сигналов различной частоты. Испытуемый должен сообщить, какой из сигналов был выше по частоте. Порядок тонов меняется случайно от пробы к пробе, за частотный дифференциальный порог принимается разница двух частот, при которой испытуемый даёт 75% корректных ответов. В англоязычной литературе этот показатель известен как difference limen for frequency (DLF).

Другой способ измерения частотных дифференциальных порогов - использование частотно-модулированных сигналов. В таких экспериментах испытуемым подаются два тона, один из которых содержит частотную модуляцию, а в другом модуляция отсутствует, необходимо определить, какой из сигналов является модулированным. Соответственно определяется минимальное значение модуляции, необходимое для различения сигналов. Такой подход известен как frequency modulation detection limen (FMDL), а минимально обнаруживаемая глубина модуляции принимается за дифференциальный порог.

В большинстве работ с использованием DLF было показано, что наименьшее значение Δf наблюдается на частоте 0.5 кГц в диапазоне интенсивностей от 40 до 80 дБ и составляет 0.2 % от центральной частоты (т.е. 1 Гц) (Wier et al., 1977). С повышением или понижением частоты частотные дифференциальные пороги увеличиваются (Wier et

al., 1977; Moore, Glasberg 1989; Sek, Moore, 1995; Micheyl et al., 2012) (рисунок 13). При повышении интенсивности от 5 до 80 дБ над порогом частотные дифференциальные пороги понижались (Wier et al, 1977; Nelson et al., 1983; Micheyl et al., 2012). Кроме того, была протестирована зависимость DLF от длительности: пороги снижались при увеличении длительности стимула (Moore, 1973; Micheyl et al., 2012).

В отличие от DLF, FMDL изменяется с частотой значительно меньше, а пороги, наоборот, уменьшаются с повышением частоты (Moore, Glasberg, 1989; Sek, Moore, 1995). Для FMDL пороги колеблются от 1% на низких частотах до 0.5% от центральной частоты на частотах выше 1 кГц. Пороги для FMLD так же, как и для DLF уменьшались с увеличением интенсивности.

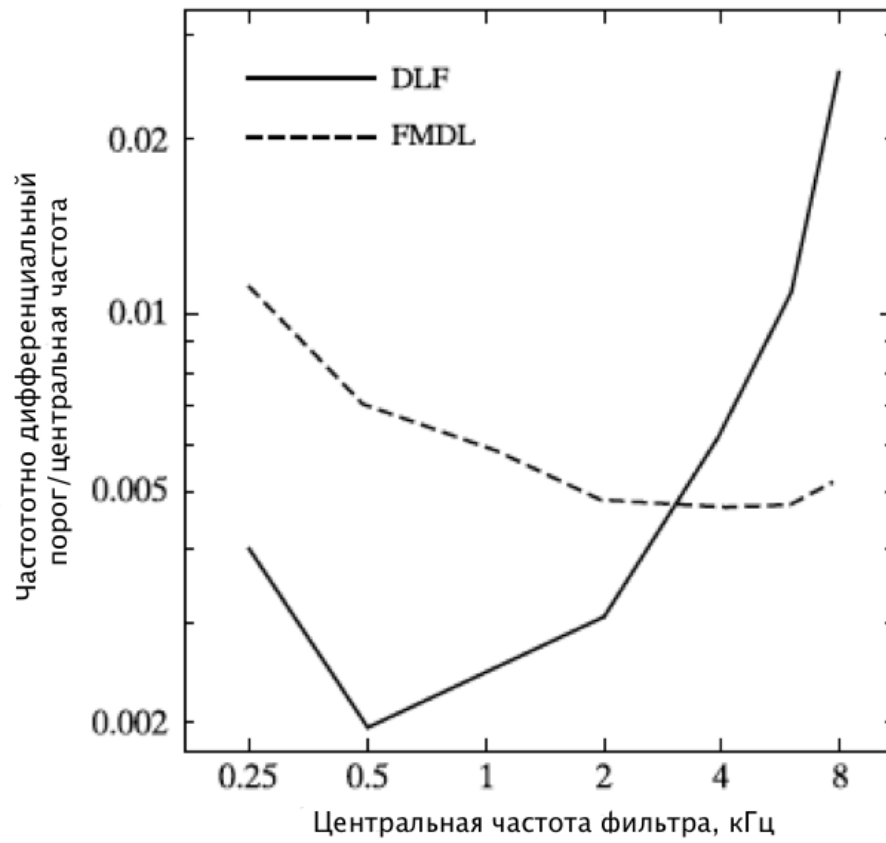


Рис.13. Зависимость DLF и FMDL (при частоте модуляции 10 Гц) от частоты. Рисунок из работы (Sek, Moore, 1995).

Для того чтобы объяснить полученные данные можно воспользоваться моделью, основанной на построении паттернов возбуждения (рисунок 14). Такая модель подразумевает, что изменение частоты простого тона приведёт к изменению уровня паттерна возбуждения на выходе слухового фильтра. Исходя из предположения Цвикера (Zwicker, 1970) о том, что минимальное изменение уровня паттерна возбуждения на его низкочастотной стороне, детектируемое слуховой системой, составляет 1 дБ, можно предсказать, что сдвиг сигнала по частоте будет различим, если уровень выходного сигнала на низкочастотной стороне одного из слуховых фильтров изменится хотя бы на 1 дБ. В дальнейшем было обнаружено, что случайная вариация интенсивности (интенсивность сигнала и интенсивность сигнала, сдвинутого по частоте, варьировалась случайно в некотором диапазоне) не оказывает значительного влияния на DLF (Moore, Glasberg, 1989; Emmerich et al., 1989; Dai et al., 1995), исключение составляют высокие частоты (Hening, 1966), хотя если бы изначальная модель была верна, пороги DLF должны были бы измениться гораздо значительнее на всем протяжении частотного диапазона. Кроме того, добавление шума, который влиял только на высокочастотную сторону паттерна возбуждения, оказывало заметное влияние на DLF только на высоких частотах, что опять же противоречит исходной модели (Emmerich et al., 1989; Moore, Glasberg, 1989). С другой стороны, пороги FMDL изменялись значительнее и при плавающей интенсивности (использовалась амплитудная модуляция) и при добавлении шума (Moore, Glasberg, 1989).

Поэтому была предложена модель, согласно которой в различении частотного сдвига сигнала принимает участие не один слуховой фильтр, а несколько, например, модель с двумя фильтрами (Dai et al., 1995), где один фильтр располагается ниже, другой выше частоты сдвигаемого тона (рисунок 14). Соответственно различение частотного сдвига будет зависеть от способности испытуемого детектировать относительное изменение выходного уровня двух фильтров. Такая модель рассматривалась только применительно к DLF и помогала объяснить результаты в экспериментах с плавающей интенсивностью и, частично, с шумом.

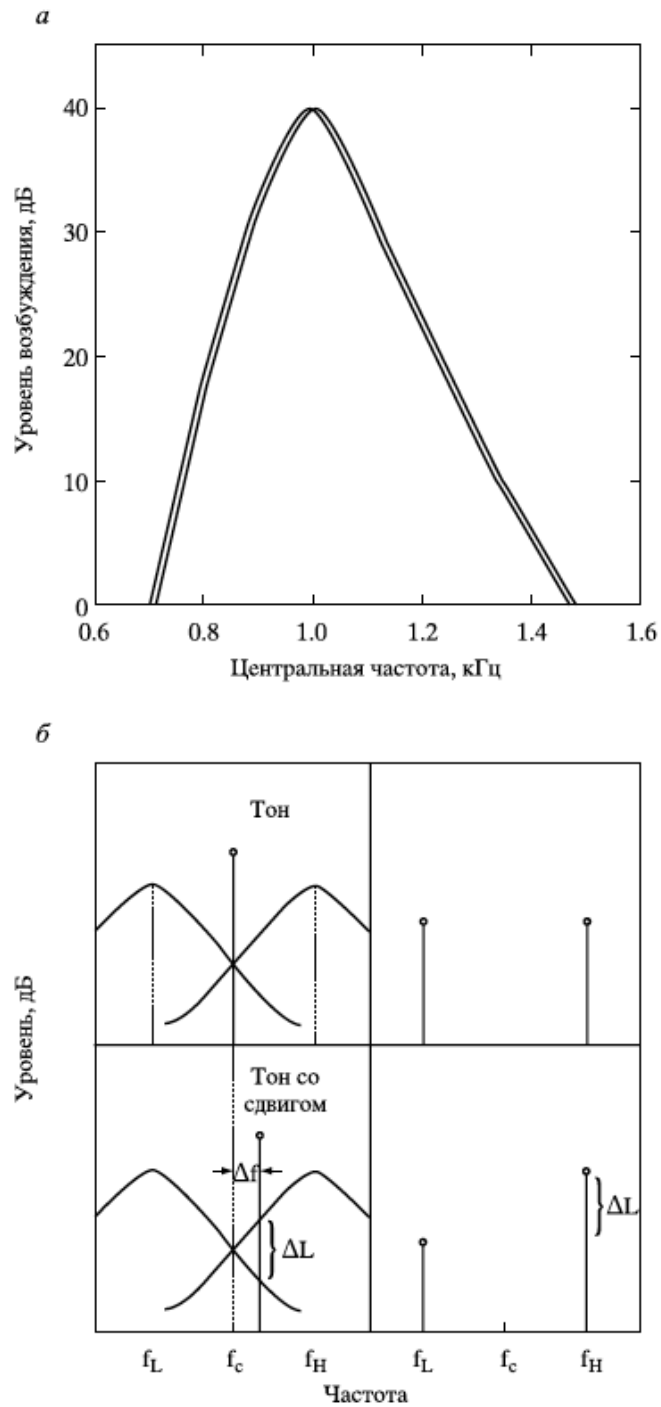


Рис. 14. Два варианта моделей, объясняющих частотные дифференциальные пороги, *а* - модель, основанная на сдвиге в одном паттерне возбуждения, *б* - модель, основанная на ответе двух слуховых фильтров, где f_L и f_H - центральные частоты двух фильтров, f_c - частота сигнала, а $f_c + \Delta f$ частота сигнала, сдвинутого по частоте. ΔL - прирост уровня ответа на сигнал, сдвинутый по частоте по сравнению с исходным. В основе рисунки из работы (Moore, 2013) и (Dai et al., 1995).

Ещё один аргумент не в пользу моделей, построенных на предположении Цвикера, связан с зависимостью DLF от длительности стимула. В случае очень короткой длительности тонового импульса наклон его спектральной огибающей станет меньше наклона паттерна возбуждения, вызываемого тоном большой длительности. Соответственно, если модель Цвикера верна, то должен быть критический период длительности, при достижении которого пороги существенно поднимутся. Однако экспериментальные данные не показали подъёма порогов до предсказанных значений.

Согласно моделям, связывающим частотную избирательность и частотное различие только через концепцию слуховых фильтров, пороги DLF должны уменьшаться, если слуховые фильтры настроены острее. Следовательно, DLF должны зависеть от частоты так же, как и значение ERB, но этого не наблюдается. Данные по FMDL согласуются с моделью, основанной на модели Цвикера, но только при частотной модуляции от 10 Гц и выше.

Данные по DLF и FMDL при низкой степени модуляции хорошо согласуются с концепцией временного анализа (Moore, Glasberg, 1989; Moore, 2013), согласно которой информация о частоте сигнала кодируется частотой импульсов волокна слухового нерва. На низких частотах спайковая активность возникает синхронизировано по фазе с частотой подаваемого сигнала. Однако синхронизация значительно падает на частотах выше 1-2 кГц и, вероятнее всего, исчезает совсем на частотах выше 5 кГц, так как нервные волокна не способны генерировать спайки с такой высокой частотой. Это хорошо согласуется с увеличением DLF на высоких частотах. Таким образом, на данный момент считается, что DLF для частот приблизительно до 5 кГц и FMDL при низкой частоте модуляции обеспечиваются работой механизма временного анализа, а анализ DLF для частот выше 5 кГц и FMDL при высокой частоте модуляции осуществляется по механизму места. В одной из последних работ по изучению DLF (Moore, Ernst, 2012) на основе результатов психоакустических исследований было сделано предположение, что временной механизм может работать и до 8 кГц, т.к. функция зависимости DLF от частоты в районе 8 кГц выходит на плато.

3.5. Воздействие помех и маскировка

В предыдущих двух главах были разобраны свойства слуховой системы (частотная избирательность и частотное различение), характерные для идеализированных условий. Но в реальном мире, как правило, целевой звуковой сигнал действует на фоне многих других звуковых сигналов (помех, маскеров). Поэтому представляет интерес установить, как изменяется различение того или иного сигнала под воздействием другого, что в свою очередь будет отражать изменение характеристик слуха.

В современном мире шумовое загрязнение представляет серьёзную угрозу для качества среды обитания человека и других позвоночных. Под шумовым загрязнением подразумевается нежелательный, часто вредоносный, звук, создаваемый без учёта возможных вредоносных последствий.

Воздействие шума (помехи) включает две большие категории: в первом случае шум оказывает опосредованное действие, ухудшая характеристики слуховой системы (абсолютную чувствительность слуха, частотную избирательность) и вызывает явление постстимульного утомления; в другом случае шум действует одновременно с целевым сигналом, маскирует его и мешает его различению.

Влияние шума на абсолютную слуховую чувствительность можно разделить на две группы, согласно степени изменения порогов:

1. Временный сдвиг порогов (temporary threshold shift (TTS)). После воздействия шума происходит изменение чувствительности слуховой системы с последующим восстановлением до исходного значения через некоторое время после прекращения вредного шумового воздействия.
2. Постоянный сдвиг порога (permanent threshold shift (PTS)). В данном случае происходит необратимая потеря слуховой чувствительности.

Можно выделить пять основных факторов, которые влияют на изменение порога: интенсивность подавляющего сигнала, длительность подавляющего сигнала, частотная полоса подавляющего сигнала, частотная полоса тестового сигнала, используемого для измерения величины сдвига порога, и временной интервал между окончанием подавляющего сигнала и началом измерения порога (интервал восстановления).

Сдвиг порога абсолютной чувствительности увеличивается с увеличением интенсивности подавляющего звука. При низких интенсивностях наблюдается

медленный рост порога, эффект проявляется на частотах, близких к частоте подавляющего звука. С увеличением интенсивности частотная область, в которой проявляется эффект, увеличивается, и максимум смещается выше частоты подавляющего звука. При высоких значениях интенсивности подавляющего звука порог растёт очень быстро, и максимальный эффект наблюдается на пол-октавы выше частоты подавляющего звука. На данный момент до конца не ясно, с чем связано смещение максимального эффекта в сторону более высоких частот, возможно, с механическими свойствами базилярной мембраны. В ряде работ было сделано предположение, что максимум колебаний базилярной мембраны, возникающий под действие подавляющего звука, сдвигается в сторону высоких частот с увеличением интенсивности (Rhode, 1971; McFadden, 1986; Ruggero et al., 1997; Moore et. al., 2002). Однако в случае подавляющего звука ниже 500 Гц (в работе использовался октавный шум с центральной частотой 63, 125 и 250 Гц) максимальный эффект проявляется в частотном диапазоне от 300 до 750 Гц (Mills et al., 1983).

Сдвиг порога также увеличивается с увеличением длительности подавляющего звука, но до некоторого предела (в зависимости от интенсивности), после которого наступает плато, и в дальнейшем порог не изменяется (asymptotic threshold shift). Зависимость между сдвигом порога и временем воздействия до наступления плато может быть описана простой экспоненциальной функцией (Mills et al., 1979). Но такая математическая модель имеет ряд ограничений, например, она не применима, когда в качестве подавляющего звука используются низкие частоты (Melnick, 1991), или если длительность подавляющего звука меньше пяти минут, или если величина асимптотического сдвига порога больше 30 дБ. Было показано, что для шума интенсивностью 88 дБ с октавной полосой и центральной частотой 4 кГц наблюдается быстрый рост сдвига порога только через час воздействия (Mills et al. 1979).

Восстановление чувствительности слуховой системы после воздействия интенсивного звука также происходит постепенно и, в первом приближении, соответствует экспоненциальной кривой. Было показано, что восстановление чувствительности после достижения асимптотического порога будет зависеть от времени воздействия подавляющего звука этого уровня. Например, восстановление после 48-часового воздействия будет дольше, чем после 24 часового, хотя значение

асимптотического сдвига порога одинаково (Melnick, 1991). Таким образом, восстановление зависит как от интенсивности, так и от длительности сигнала.

В ряде работ был получен интересный эффект, который касается первых минут восстановления после шумового воздействия. При использовании низкочастотного подавляющего звука восстановление чувствительности слуха на высоких частотах состоит из двух частей. На первой минуте после окончания воздействия наблюдается небольшое восстановление, после чего на второй минуте происходит резкое повышение порога; а далее уже следует постепенное восстановление. Это может свидетельствовать о том, что в восстановление чувствительности слуховой системы вовлечены два процесса: быстрый процесс, который может соответствовать восстановлению нейронной активности, и длительное восстановление метаболизма эндолимфы и волосковых клеток (Salt, 2004).

Кроме того, физиологические исследования показали, что восстановление порога чувствительности до первоначального значения не говорит об отсутствии какого-либо повреждения слуховой системы, например, было обнаружено, что подавляющей шум, который приводил только к временному сдвигу порога, вызывал деградацию слухового нерва (Kujawa, Liberman, 2009).

После подавляющего воздействия звукового сигнала может изменяться не только абсолютная чувствительность слуха, но и частотная избирательность. Такой эффект был показан в нескольких работах. Оказалось, что с увеличением порога чувствительности выше 30 дБ порога слышимости, наблюдается ухудшение частотной избирательности (Bergman et al., 1991). В другой работе продемонстрировано, что после длительного шумового воздействия происходит расширение нейронных настроечных кривых, уменьшение значения добротности слуховых фильтров (Q_{10}) и потеря чувствительности на характеристической частоте, которая соответствует наиболее острой части настроечной кривой, что является свидетельством ухудшения частотной избирательности слуха. Расширение настроечной кривой может наблюдаться и при совсем незначительном сдвиге порога чувствительности (Salvi et al., 1978; Liberman, Beil, 1979; Feth et al., 1979; Chermak, Dengerink, 1987; Dolan, Mills, 1989).

3.6. Механизмы маскировки

Второй тип влияния помехи на различение звукового сигнала - маскировка, т.е. эффект, когда целевой звуковой сигнал становится неразличим под действием одного или более маскировочных звуков. В первой главе данного обзора явление маскировки уже частично обсуждалось, так как оно широко используется как метод для изучения частотной избирательности и многих других свойств слуховой системы.

Для того чтобы оценить эффект маскировки количественно, прежде всего необходимо определить пороги маскировки. Порог маскировки – это уровень звукового давления тестового (целевого) сигнала, который необходим, чтобы он был различим в присутствии маскирующего звука.

Можно выделить несколько вариантов маскировки. Наиболее полно изученный и наиболее часто встречающийся в природе вариант - это одновременная маскировка (*simultaneous masking*). Под одновременной маскировкой подразумеваются все ситуации, когда маскер звучит на всём протяжении длительности целевого сигнала. Маскер может начинаться раньше, может продолжаться после окончания сигнала, но сигнал, никогда не предъявляется без маскера.

Следующая категория - это неодновременная маскировка (*non-simultaneous masking*), в которой можно выделить прямую последовательную (*forward*) и обратную (*backward*) маскировки. Прямая последовательная маскировка наблюдается, когда маскер предшествует сигналу, но не перекрывается с ним во времени. У человека последовательная маскировка обычно наблюдается, когда временной интервал между маскером и сигналом не превышает 200 мс. Чем меньше интервал, тем более значителен эффект маскировки. Зависимость последовательной маскировки (в дБ) от логарифма временного интервала линейна. В отличие от одновременной маскировки, где порогу соответствует некоторое постоянное отношение интенсивностей сигнала и маскера, в случае последовательной маскировки увеличение уровня маскера не приводит к эквивалентному увеличению величины маскировки (увеличение уровня маскера на 10 дБ может привести к увеличению порога на 3 дБ).

Эффект обратной маскировки наблюдается, когда сигнал предшествует маскеру на короткое время. У человека обратная маскировка наблюдается, если задержка между окончанием сигнала и началом маскера не превышает 10 мс. Эффект обратной маскировки очень нестабилен и более изменчив, чем последовательная маскировка.

Кроме того, эффект обратной маскировки может уменьшаться с обучением испытуемого (Альтман, Таварткиладзе, 2003; Oxenham, Wojtczak, 2010; Moore, 2013).

3.6.1. Механизмы одновременной маскировки

На данный момент предполагается, что в основе одновременной маскировки лежат два механизма. Первый из возможных механизмов – это энергетическая маскировка (excitatory effect, swamping). Сущность энергетической маскировки состоит в том, что подача маскирующего звука приводит к возникновению колебаний базилярной мембраны значительной величины и, соответственно, значительно возрастает активность в слуховом фильтре (критической полосе), соответствующем частоте сигнала. При этом активность, добавляемая сигналом, может стать уже неразличимой на фоне активности от маскера. Например, предположим, что порог маскировки достигается, когда уровень тонального сигнала на выходе слухового фильтра на 4 дБ ниже, чем маскера. Тогда паттерн возбуждения от сигнала вместе с паттерном возбуждения от маскера будет на 1.5 дБ выше, чем уровень возбуждения производимый одним маскером. Следовательно, можно сказать, что 1.5 дБ - это минимальное приращение паттерна возбуждения, необходимое для различения сигнала. Если же уровень сигнала много меньше, чем уровень маскера, проходящего через данный фильтр, тогда он создаст незначительный прирост возбуждения. Например, если разница в уровнях составит 20 дБ, то прирост составит меньше 0.05 дБ, в то время как минимальное необходимое значение изменения уровня в паттерне возбуждения варьирует от 1 до 1.5 дБ в зависимости от типа сигнала (Moore, 2013). Наиболее важное предположение, которое следует из этой модели, состоит в том, что пороговый уровень сигнала даёт возможность оценить активность маскера на характеристической частоте, соответствующей частоте сигнала. В результате получили, что пороговый уровень сигнала пропорционален величине паттерна возбуждения от маскера на частоте сигнала. Это предположение далее стало использоваться для оценки частотной избирательности слуха и построения моделей слуховых фильтров (см. первую часть).

Другой возможный механизм одновременной маскировки связан с эффектом подавления (suppression). Первоначально подавление было обнаружено при изучении ответов базилярной мембраны и нейронной активности (Sachs, Kiang, 1968). Нейронный

ответ на тональный сигнал может быть подавлен добавлением второго тона другой частоты – двухтоновое подавление (более подробно см. в первой части).

В случае маскировки, подавление проявляется в том, что маскер снижает ответ на сигнал до такой степени, что вызванная активность будет неотличима от спонтанной активности в отсутствии звуковой стимуляции. В нескольких работах была проверена такая возможность. Дельгатте (Delgutte, 1990) попытался оценить соотношение энергетической маскировки и подавления, используя тональную маскировку и регистрируя ответы волокна слухового нерва. Он использовал парадигму, сочетающую одновременную и последовательную маскировки. В случае одновременной маскировки были измерены ответы волокна слухового нерва отдельно на маскер и на маскер вместе с сигналом. Порог маскировки оценивался исходя из уровня сигнала, который необходим для того, чтобы маскер вместе с сигналом вызывали в волокне слухового нерва количество спайков, отличное от такового при действии одного маскера. При последовательной маскировке сравнивались ответы волокна слухового нерва отдельно на сигнал и маскер. Предполагалось, что при последовательной маскировке подавление не работает, т.к. сигналы разнесены во времени. Дельгатте сравнил пороги при одновременной и неодновременной маскировке, чтобы оценить вклад энергетической маскировки и подавления. Предполагалось, что если подавление доминирует при одновременной маскировке, то пороги при одновременной маскировке должны быть выше, чем при не одновременной. В результате было обнаружено следующее: при низкой интенсивности маскера в 45 дБ УЗД и при всех частотах маскера, близких к частоте сигнала, основную роль играет энергетическая маскировка, в то время как для высоких уровней маскера и при частотах сигнала, более высоких, чем частота маскера (0.5 октавы), на первый план выходит эффект подавления. Однако, даже когда подавление значительно, энергетическая маскировка присутствует.

Эффект подавления как механизм маскировки был также изучен в психоакустических экспериментах (Moore, Vickers, 1997; Oxenham, Plack, 1998). Основной задачей было сравнение эффективности низкочастотного маскера в случае одновременной и неодновременной маскировок. Было показано, что подавление играет наибольшую роль при низкочастотном маскере высокой интенсивности. Но всё же два механизма работают одновременно: подавление без энергетической маскировки обнаружено не было.

3.6.2. Механизмы неодновременной маскировки

Неодновременная маскировка использовалась для того, чтобы отделить механизм подавления от энергетической маскировки, так как предполагалось, что эффект подавления в таких условиях отсутствует: латеральные эффекты на базилярной мембране прекращаются одновременно с выключением звука-маскера..

Прямая последовательная маскировка изучена более полно, чем обратная. Первое объяснение механизма последовательной маскировки основано на свойстве базилярной мембраны как набора частотных полосовых фильтров. Импульсный ответ любого фильтра, в том числе и слухового, продолжается ещё некоторое время после окончания импульсного стимула (фильтр «звенит»). Если «звон» фильтра, вызванный маскером, перекрывается во времени с началом ответа на сигнал, возникнет эффект последовательной маскировки (Duifhuis, 1973). Однако, ответ фильтра, после импульса маскера обычно содержит только несколько циклов характеристической частоты фильтра, в то время как последовательная маскировка проявляется при интервалах до 200 мс.

Другие два механизма, которые могут отвечать за неодновременную маскировку, - это нейронная адаптация и нейронная временная суммация (persistence). Нейронная адаптация состоит в том, что ответ нейрона на сигнал уменьшается, если ему предшествует другой сигнал. Данное явление было описано в слуховом нерве как возможное объяснение психоакустических данных последовательной маскировки (Smith, 1979). Однако эффект, полученный на отдельном волокне слухового нерва, слишком мал, чтобы объяснить поведенческие результаты (Turner et al., 1994). Таким образом, одна только адаптация не может объяснить результаты последовательной маскировки, (Meddis, O'Mard, 2005).

Другой механизм последовательной маскировки - нейронная временная суммация - менее популярен среди исследователей, но есть ряд работ, в которых были построены количественная и качественная модели последовательной и обратной маскировок на основе этого механизма (Dau et al., 1996). Идея состоит в том, что последовательная маскировка отражает продолжение ответа на маскер, а не уменьшение в ответе на сигнал. Но пока нет надёжных доказательств временной суммации в слуховом нерве, она была обнаружена только в корковых отделах слуховой системы после окончания стимула. Хотя с одной стороны это может быть продолжающаяся устойчивая

активность, с другой стороны это может быть отдельный ответ на выключение стимула (Recanzone, 2000). Временную суммацию можно смоделировать, допустив, что после частотно-избирательного слухового фильтра сигнал проходит через временной интегратор, который сглаживает и растягивает во времени сигнал таким образом, что ответ на маскер перекрывается с ответом на тест-сигнал.

Таким образом, несмотря на попытки разделить адаптацию и временную суммацию, нет достаточно полных данных о степени участия того и другого механизма в эффектах последовательной маскировки.

3.6.3. Влияние маскировки на различение частотного сдвига сигнала

Помимо влияния маскера на обнаружение сигнала изучалось влияние маскировки на различение спектральных изменений в звуковом сигнале - как простом, так и сложном.

Достаточно детально изучены частотные дифференциальные пороги в условиях маскировки для простых тональных сигналов. В таких работах в качестве сигнала использовался тон, а в качестве маскера разнообразные шумы: широкополосный шум (Henning, 1966; Werner, 1995), белый шум (Emmerich et. al., 1986; Fantini, 1988), шум со спектральным вырезом (Emmerich et. al., 1983; 1989), полосовой шум (Fantini, Emmerich, 1987; Fantini, 1988; Moore, Glasberg, 1989).

Было показано, что зависимость частотных дифференциальных порогов от отношения интенсивностей сигнал/маскер не одинакова для разных частот. На частотах от 0.5 до 1 кГц частотные дифференциальные пороги уменьшаются при увеличении громкости сигнала, и сохраняются при этом постоянными отношениями интенсивностей сигнал/маскер. На частоте 3 кГц пороги при тех же условиях, наоборот, увеличивались. На частоте 2 кГц изменений порога не происходит (Dye, Hafter, 1980).

В случае шума со спектральным вырезом было показано, что различение сдвига частоты тона зависит от ширины спектрального выреза, благодаря этому была выявлена роль «хвостов» профиля возбуждения в обнаружении частотного сдвига. При сравнении данных по различению частотного сдвига и обнаружения тона на фоне шума со спектральным вырезом, оказалось, что при различении частотного сдвига используется

информация с более широкого частотного диапазона, чем при обнаружении сигнала (Emmerich et al., 1983).

Далее, при использовании различных комбинаций шумов было выявлено, что различие частотного сдвига тона, расположенного в спектральном вырезе шума, но ближе к низкочастотной составляющей, хуже, чем при расположении ближе к высокочастотной составляющей. Если же тест-сигнал располагается чуть выше маскирующего шума, а с высокочастотной стороны добавляется шум, то частотные дифференциальные пороги уменьшаются (Emmerich et. al., 1986). Если тест-сигнал ближе по частоте к высокочастотному краю вырезки, то такой шум не влияет на частотный дифференциальный порог (Nelson, Stanton, 1982). Частотное различие улучшается, когда края частотной полосы шума становятся более пологими (Fantini, Emmerich, 1987).

При сравнении частотных дифференциальных порогов в белом шуме и в шуме, расположенном на частотной шкале ниже тест-сигнала, было показано, что белый шум оказывает меньшее влияние, причём разница увеличивается с повышением уровня маскира. В случае последовательной маскировки такое различие нивелируется. Исходя из этого, было сделано предположение о значительной роли в маскировке латерального подавления при частоте шума ниже частоты сигнала (Emmrich et al., 1986; Fantini, 1988).

Шумовой маскир также оказывал влияние на пороги различения частотной модуляции сигнала (FMDL), это влияние было сильнее, чем влияние на частотные дифференциальные пороги (DLF) (Moore, Glasberg, 1989).

Влияние шума на различение изменений в сложном сигнале тестировалось на примере гребенчатых спектров (влияние маскира на частотную разрешающую способность), комплексных тонов (влияние маскира на различение основной гармоник и сдвига гармоник), а также на различение речевого сигнала (влияние маскира на различение частотного сдвига отдельных формант).

Ноекстра (1967) измерял пороги различения изменения основной гармоник (F_0) в последовательности импульсов. Пороги различения сдвига (F_0DLs) измерялись как функция уровня тона относительно его порога маскировки в шуме. Для F_0 200 Гц, F_0DLs уменьшались с увеличением уровня до тех пор, пока уровень тона был на 15 – 20 дБ выше порога маскировки.

Были измерены пороги обнаружения изменения основной гармоник (F_0) комплексного тона как функция от интенсивности розового шума (Moore, Glasberg, 1991). Шум не оказывал какого-либо эффекта на различение сдвига (F_0DLs), пока уровень шума не становился настолько громким, что изменения в сигнале были почти не различимы. В другой работе была сделана попытка оценить, как связаны между собой проценты правильных ответов при обнаружении частотного сдвига основной гармоник и при обнаружении комплексного тона в розовом шуме. Уровень правильных ответов при различении изменений в комплексном тоне падает с увеличением громкости шума, но такое падение не при всех условиях коррелирует с различением комплексного сигнала (Gockel et al., 2006). Расчёт профилей возбуждения показал, что при максимальном используемом сдвиге 4% и небольшом уровне шума изменение в нем составляет 1.3 дБ, такое значение согласуется с минимально детектируемым по Цвикеру. При увеличении интенсивности шума разница в профиле возбуждения составляла уже 0.5 дБ, но при этом большая часть испытуемых по-прежнему обнаруживала частотный сдвиг в комплексном тоне с точностью 70%. Испытуемые были способны определять частотный сдвиг в 2% при уровне шума 8 и 14 дБ, что соответствует изменению в 0.4 и 0.25 дБ. Минимальное определяемое изменение в профиле возбуждения из всех ранее проведённых исследований составляло 1 дБ. Следовательно, при анализе частотного сдвига комплексного тона в шуме работает какой-то другой механизм. Вероятнее всего, основную роль играет временной механизм анализа. Похожее заключение было сделано при изучении частотного сдвига отдельных компонент комплексного тона без шума (Moore et al., 1984).

С использованием шумовых сигналов с гребенчатым спектром было проверено, как шумовые помехи различной конфигурации влияют на частотную разрешающую способность слуха. Эффект прежде всего зависел от соотношения частот маскера и сигнала. При совпадении спектральных полос маскера и сигнала эффект практически отсутствовал до тех пор, пока уровень маскера не превышал уровня сигнала. Как только уровень маскера на несколько дБ превосходил уровень тест-сигнала, частотная разрешающая способность слуха стремительно падала. В случае низкочастотной помехи эффект маскировки был более плавным. Снижение частотной разрешающей способности наблюдалось уже при низких уровнях помехи. Но различение спектральной структуры сигнала было ещё возможно при интенсивности маскера более

20 дБ относительно тест-сигнала. Высокочастотная помеха минимально влияла на частотную разрешающую способность. Предположительно, при совпадающих по частоте маскере и сигнале имеет место классическая энергетическая маскировка. В случае же низкочастотного маскера вероятно, что помимо энергетической маскировки на различение спектрального рисунка оказывает влияние также и латеральное подавление. Было протестировано влияние низкочастотного маскера на ЧРС при его различном положении по частотной шкале относительно спектра сигнала; оказалось, что максимальный негативный эффект помехи наблюдается, когда полоса помехи расположена на 0.25-0.5 октавы ниже полосы сигнала (Супин и др., 2002; Супин, 2007). В данном случае, как уже говорилось ранее, исходя из отсутствия временной структуры сигнала и сложности анализа скрытой временной структуры автокоррелограммы, самый вероятный механизм анализа основан на определении изменений в профиле возбуждения, а не на использовании временного анализа.

Влияние маскеров на различение речевого сигнала также активно изучается. Как в поведенческих, так и электрофизиологических экспериментах (регистрация вызванных потенциалов мозга) было показано, что различение речи снижается при увеличении шумового воздействия. Например, способность различать слоги ухудшается с увеличением громкости шума. Различные типы шума влияют на различение речи по-разному, например, прерывистый шум оказывает меньшее воздействие, чем постоянный, а белый шум менее эффективен, чем структурированный шум (Kujala, 2009).

Если говорить о более тонких спектральных изменениях речевого сигнала, то в ряде работ было протестировано влияние маскирующего шума на частотный сдвиг отдельной форманты речевого сигнала. Частотные дифференциальные пороги для первой и второй формант по разным оценкам составляют: 1-5% (Flanagan, 1955), 6.8% (Mermelstein, 1978), 1.9% (Hawks, 1994), 1-2% (Kewley-Port, Watson, 1994; Kewley-Port et al., 1996). Для первой форманты минимально различимый сдвиг был постоянен и составлял 14 Гц для частот до 800 Гц и увеличивался с частотой форманты с шагом 10 Гц на 1000 Гц. Для второй форманты порог был приблизительно 1.5%. Было показано, что шум (в данной работе использовали long-term speech-shaped noise и multi talker babble) оказывает значительное влияние на различение сдвига форманты, при изменении отношения сигнал/шум от +4 до -4 дБ пороги возрастали более чем в три раза. Кривая маскировки как для первой, так и для второй формант, имеет экспоненциальный

вид для обоих типов шума. Зависимость от частоты также прослеживалась, шум оказывал большее влияние на различение частотного сдвига во второй форманте (более высокая частота) (Liu, Kewley-Port, 2004).

Подводя итог рассмотренным литературным данным, можно сделать вывод, что для восполнения ряда пробелов в существующих знаниях о частотной избирательности слуха и способности к различению спектральной структуры сигнала как в нормальных условиях, так и в присутствии звуковых помех, представляет интерес исследование различения человеком спектрально-временных изменений сигнала с гребенчатым спектром, в оптимальных условиях и при маскировке. Сигнал с гребенчатым спектром является хорошей моделью для изучения анализа сложных сигналов в слуховой системе, в данной работе отдаётся предпочтение узкополосному спектру сигнала, так как он позволяет оценить отдельные частотные диапазоны слуха, в отличие от широкополосного сигнала.

4. Методика

4.1. Испытуемые

В экспериментах принимали участие восемь испытуемых, в возрасте от 21 до 60 лет. Перед каждой экспериментальной серией для всех испытуемых были получены аудиограммы, которые не выявили значительных отклонений слуха от нормы. Шесть испытуемых имели большой опыт участия в психоакустических экспериментах.

4.2. Параметры сигналов

В качестве тест-сигнала использовали узкополосный шум с гребенчатой формой спектра. Полная ширина спектральной полосы шума составляла одну октаву, ширина полосы на уровне половины спектральной мощности равнялась половине октавы, таким образом, эквивалентная прямоугольная ширина также была пол-октавы. Огибающая спектра имела вид одного периода косинусоиды от логарифма частоты. Пологая форма спектральной огибающей была выбрана, потому что она не создаёт дополнительных психоакустических эффектов, которые возникают при использовании спектральной полосы с крутыми краями, такие как ощущение высоты звука, соответствующие частоте среза (Small, Daniloff, 1967; Kohlrausch, Houstman, 1992). Кроме того, крутые края спектральной полосы гребенчатого спектра облегчают его различение (Supin et al., 1998). В пределах огибающей спектр сигнала содержал периодически чередующиеся максимумы и минимумы спектральной плотности (гребни и провалы), интервалы между которыми были частотнопропорциональны. Такая форма спектра описывается следующей формулой:

$$W = (1 + \cos(2 \cdot \pi \cdot \log_x f)) \cdot (1 + \cos(2 \cdot \pi \cdot D \ln f))^n$$

Где W – спектральная мощность сигнала, f – частота, D – параметр, определяющий плотность гребней спектра, x – параметр в основании логарифма, определяющий ширину гребней спектра (в данной работе $x=2$, следовательно, ширина спектра составляла одну октаву), параметр n определяет ширину гребней спектра, при $n=1$ гребни имеют форму косинусоиды от логарифма частоты. Первый множитель

функции задаёт форму огибающей спектра, второй сомножитель описывает форму гребенчатой структуры. Умножение двух частей формулы приводит к тому, что гребенчатая структура «вписывается» в заданную огибающую. Полученный результат задаёт используемую нами гребенчатую структуру спектра сигнала (Рисунок 15).

Количество гребней в спектре сигнала определяется параметром плотности гребенчатого спектра D . Плотность гребней спектра может быть измерена в относительных значениях, в этом случае:

$$D_{rel} = f / \partial f,$$

где f - центральная частота гребня, а ∂f - частотный интервал между соседними гребнями, и измеряемая величина задаётся в безразмерных (относительных) единицах. Альтернативный способ измерения плотности гребней - в количестве гребней на октаву: D_{oct} . Измеряемая величина задается в цикл/окт. Между собой эти две размерности связаны следующим соотношением:

$$D_{oct} = D_{rel} \cdot \ln 2 = D_{rel} \cdot 0.7$$

В данной работе будет использоваться плотность в цикл/окт, т.к. такая размерность более популярна в литературе.

Частотные дифференциальные пороги определяли для плотностей 1.4, 2.1, 3.5, 4.9, 6.3, 7, в некоторых экспериментах испытуемые были способны различать частотный сдвиг при плотности до 9 цикл/окт. Тестирование влияния шумов на частотные дифференциальные пороги проводили при плотности 3.5 цикл/окт, так как при данной плотности гребней спектра частотные дифференциальные пороги имели минимальное значение.

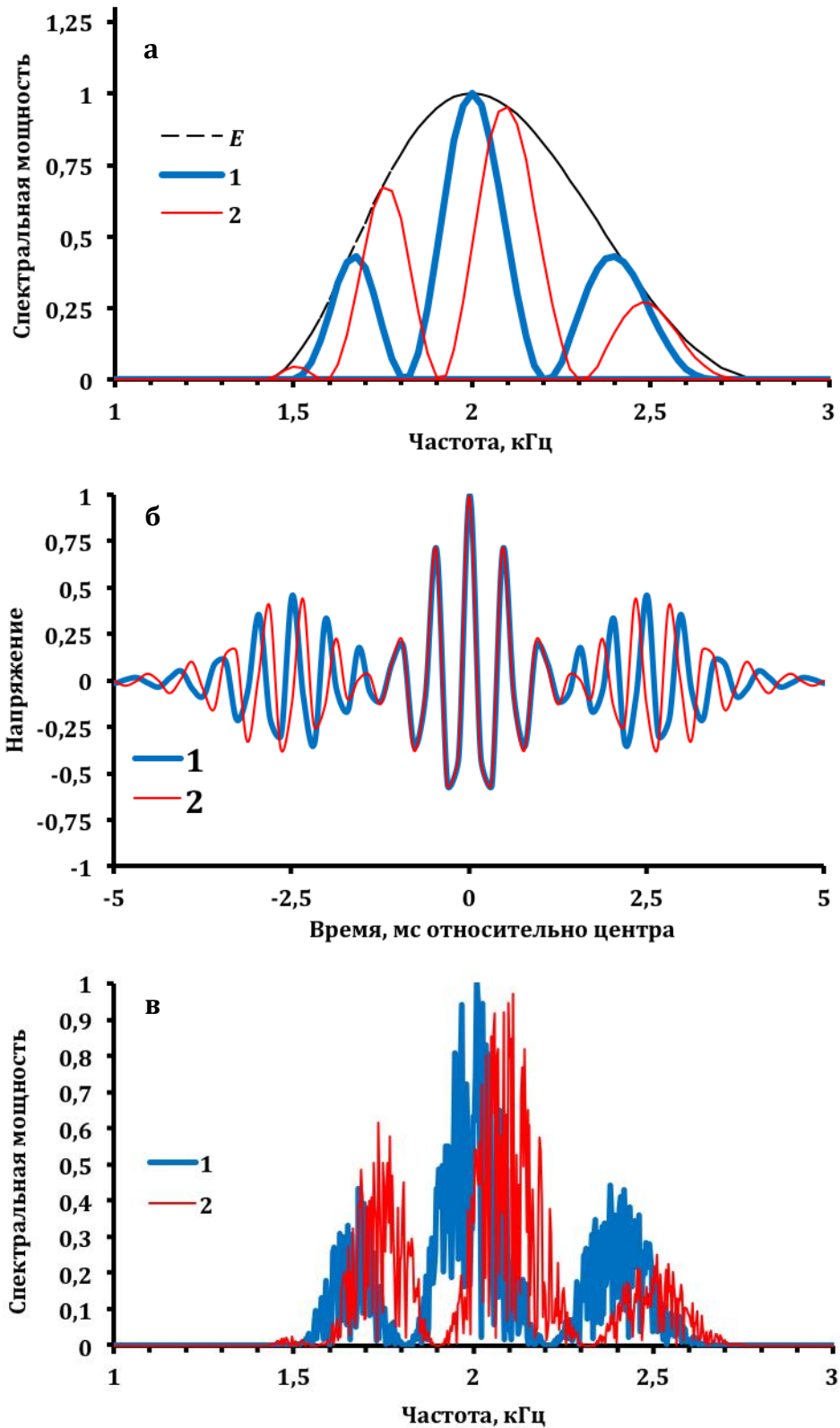


Рис. 15. а – форма цифрового фильтра для синтеза сигнала, б – передаточная функция фильтра, в – пример гребенчатого спектра сигнала, плотность 3.5 цикл/окт. 1 и 2 спектры, сдвинутые относительно друг друга по частоте. Пунктир – огибающая спектра.

Ширину гребней спектра изменяли за счёт показателя степени n (см. формулу). Возведение косинусоиды в степень приводило к сужению гребней спектра и увеличению промежутка между ними. Ширину гребней можно определить относительным значением их эквивалентной прямоугольной ширины (ERB):

$$B = E/f,$$

где B – относительная ширина гребней, E – эквивалентная прямоугольная ширина и f – частота.

Другой способ выразить ширину гребней спектра - это ширина гребней в процентах от интервала между гребнями, где интервал между гребнями составляет:

$$S = \Delta f / f,$$

где Δf – ширина гребня спектра (кГц), f – центральная частота гребня.

Ещё один параметр, описывающий форму гребенчатого спектра, - глубина модуляции. Глубина модуляции спектра – безразмерная величина m :

$$m = (P_{max} - P_{min}) / (P_{max} + P_{min})$$

где P – спектральная мощность соответственно в максимумах и минимумах гребней. В данном исследовании глубина модуляции спектра во всех сигналах оставалась постоянной и составляла единицу – максимально возможное значение.

Для тестирования чувствительности слуха к смещениям спектрального рисунка (нахождение частотных дифференциальных порогов) использовали два сигнала, которые отличались положением спектральных пиков в пределах спектральной полосы, при этом все остальные параметры сигнала оставались прежними. Различия между положениями гребней характеризовали в процентах от частоты. Спектр, сдвинутый по частотной шкале, описывается следующей функцией:

$$W = (1 + \cos(2\pi \cdot \log_x f)) \cdot (1 + \cos(2\pi \cdot D(\ln f - \ln(s/100 + 1))))^n$$

где s – значение сдвига гребенчатого спектра в процентах от исходной частоты. Возможный максимальный сдвиг составляет $\frac{1}{2}$ частотного интервала между гребнями, такому сдвигу соответствует полная реверсия фазы гребней спектра. Важно отметить, что сдвигались только гребни спектра, тогда как огибающая оставалась неизменной.

В качестве маскирующего шума использовали узкополосный шум, огибающая спектра которого имела вид одного периода косинусоиды от логарифма частоты, а ширина спектральной полосы составляла одну октаву (Рисунок 16). Спектр маскира можно описать следующей функцией:

$$W = (1 + \cos(2\pi \cdot \log_x f))$$

где W – спектральная мощность маскира, f – частота, x – основание логарифма, определяет период косинусоиды (в случае периода в одну октаву $x=2$).

В работе было протестировано влияние трёх положений маскира относительно тест-сигнала:

1. Маскер был центрирован на частоте на одну октаву ниже, чем частота тест-сигнала, т.е. центральная частота маскира составляла 1 кГц.
2. Маскер и тест-сигнал совпадали по центральной частоте (2 кГц), т.е. спектральные полосы маскира и сигнала полностью перекрывались.
3. Маскер был центрирован на частоте на одну октаву выше, чем тест-сигнал, т.е. центральная частота 4 кГц.

Интенсивность тест-сигнала при измерении частотных дифференциальных порогов варьировали от 50 до 90 дБ. При изучении влияния маскира на различение частотного сдвига сигнала интенсивность сигнала составляла 50 и 80 дБ. Интенсивность маскира варьировали от 30 до 100 дБ при интенсивности тест-сигнала в 50 дБ, и от 60 до 100 дБ при интенсивности тест-сигнала 80 дБ.

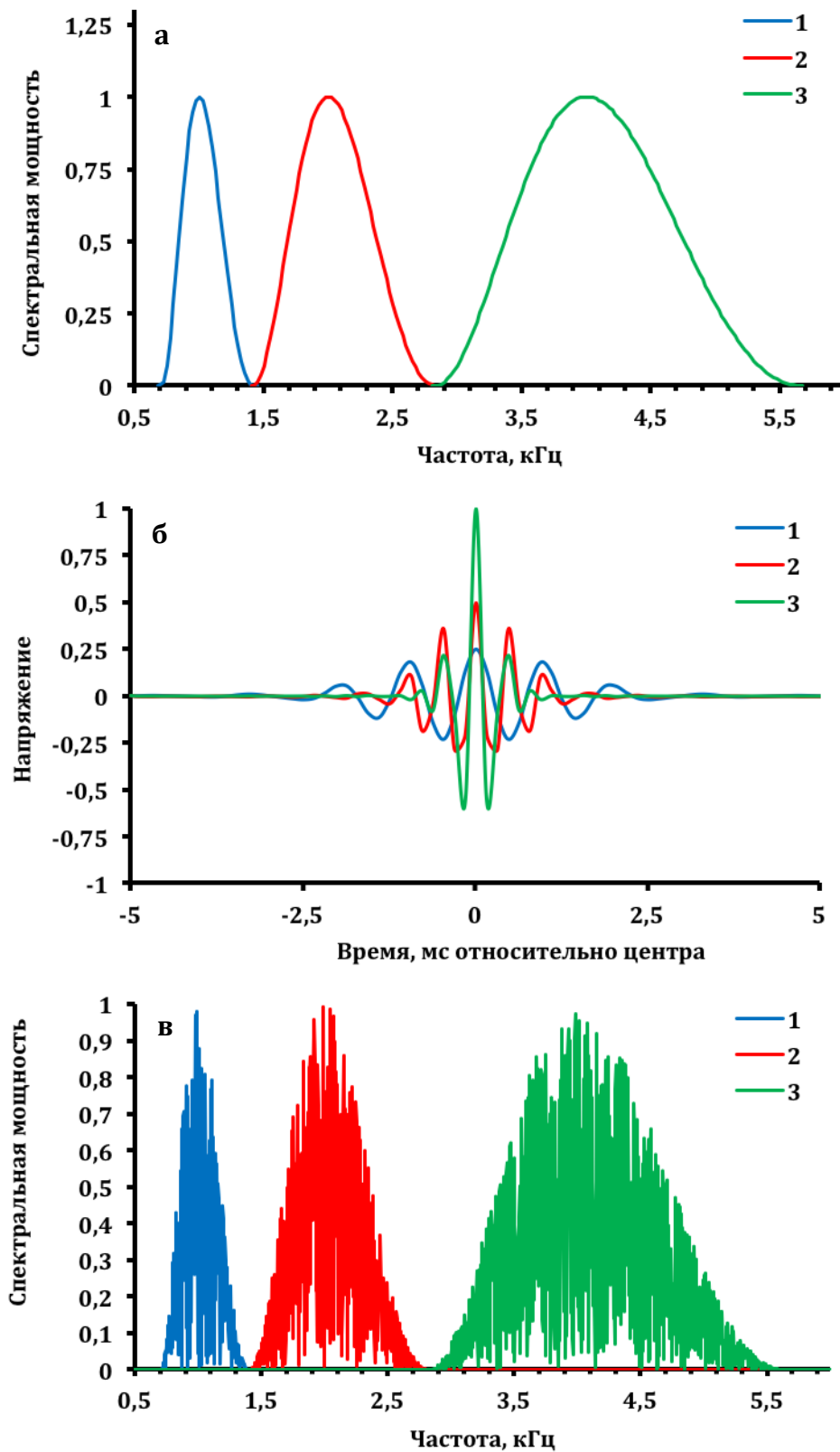


Рис. 16. а - форма цифрового фильтра для маскера, б – передаточная функция фильтра, в – спектр маскирующего фильтра. 1 – низкочастотный маскер, 2 - маскер, совпадающий по частоте, 3 – высокочастотный маскер.

4.3. Синтез сигналов

Описанные выше сигналы синтезировали в цифровой форме. Для этого задавали форму желаемого гребенчатого спектра в двух вариантах, которые отличались положением гребней спектра на частотной шкале. Отдельно задавали форму маскирующего сигнала. Далее путём обратного преобразования Фурье получали передаточные функции фильтра с заданными спектральными характеристиками. Параллельно синтезировался белый шум (в цифровом варианте - случайная последовательность чисел). Он фильтровался путём свёртки с полученной передаточной характеристикой. В результате получали последовательность чисел, описывающую сигналы с заданным спектральным рисунком. С выходов фильтров полученные цифровые последовательности подавались на сумматор, где, при переключении коммутатора происходила смена сигнала со спектром, заданным фильтром 1, на сигнал со спектром, заданным фильтром 2, и обратно. Цифровой сигнал с выхода сумматора подавался на цифроаналоговый преобразователь.

С использованием такой процедуры синтезировали два сигнала с гребенчатой структурой спектра, обозначаемые ниже как переменный и постоянный. При синтезе переменного сигнала для фильтрации белого шума использовали два фильтра, отличающиеся один от другого положением гребенчатого спектра на частотной шкале. Раз в 400 мс происходило переключение белого шума с одного фильтра на другой. Таким образом, каждые 400 мс происходил сдвиг спектра сигнала по частоте. За всё время действия стимула происходило три полных цикла переключений от одного фильтра к другому, т.е. общая длительность сигнала составляла 2.4 сек. Второй сигнал генерировали так же, но оба используемых цифровых фильтра были одинаковы. Таким образом, сигнал не содержал сдвига спектра по частоте. Длительность сигнала также составляла 2.4 с.

Маскирующий сигнал синтезировали так же, как и тест-сигнал, за исключением того, что для его синтеза использовали только один фильтр, т.к. маскер оставался постоянным и не изменялся на протяжении всей своей длительности, которая также составляла 2.4 с.

Цифровой синтез всех сигналов выполняли на персональном компьютере, используя программы, составленные на базе программной оболочки Lab VIEW. Цифровой синтезированный сигнал переводили в аналоговую форму, используя 16-

битный цифроаналоговый преобразователь USB-6251 (National Instruments, США). Сигнал воспроизводили диотически, т.е. идентично на оба уха испытуемого через наушники Sennheiser HD 580. Наушники имели неравномерность амплитудно-частотной характеристики не больше 3 дБ в диапазоне от 1 до 8 кГц. Уровень сигналов, воспроизводимых наушниками, контролировали при помощи шумомера Testo 816 с адаптером 6 см³.

4.4. Процедура измерения

Измерения проводили в помещении, где уровень фонового шума не превышал 30 дБ. Для измерения порогов использовали двухальтернативную процедуру с принудительным выбором в сочетании с адаптивным методом варьирования параметров тест-сигналов (методом лестницы).

Процедура состояла в следующем. Каждое предъявление сигнала включало две звуковые посылки длительностью по 2.4 секунды с паузой между ними 0.4 секунды. В одной из звуковых посылок (переменный сигнал) происходил сдвиг спектра сигнала по частоте как описано выше – три цикла переключения от одного из двух спектров, различающихся фазой гребенчатой структуры, к другому и обратно. Субъективно воспринимается как кратковременное изменение тембра звука. В другой звуковой посылке (постоянный сигнал) изменений не содержалось. Звуковые посылки чередовались от пробы к пробе в случайном порядке (первая – переменная, вторая постоянная, или наоборот). Задачей испытуемого было обнаружить, в какой из двух посылок присутствуют какие-либо изменения сигнала, и сообщить, где были изменения, в первой или во второй посылке.

При тестировании влияния шума на различение частотного сдвига гребенчатого спектра использовали парадигму одновременной маскировки, т.е. маскирующий сигнал подавали одновременно с тест-сигналом, и их длительности были равны.

Адаптивный метод варьирования параметров тест-сигнала состоял в том, что величину сдвига фазы гребенчатого спектра в предъявляемых тест-сигналах меняли от пробы к пробе в зависимости от ответов испытуемого в предыдущей пробе. Измерения начинали с заведомо надпорогового значения частотного сдвига (с полной реверсии фазы гребней) и далее в каждой последующей пробе значение сдвига фазы

устанавливали в зависимости от результата предыдущей пробы. На начальном этапе эксперимента после каждого правильного ответа испытуемого сдвиг фазы уменьшали на 1% до первого ошибочного ответа. Дальнейшая часть процедуры считалась измерительной: после ошибки сдвиг фазы увеличивали на 0.5%, после трёх правильных ответов подряд сдвиг фазы уменьшали на 0.5% (метод лестницы). Процедуру продолжали до получения пяти пар точек перегиба от уменьшения сдвига фазы к увеличению, и обратно. Среднее значение этих десяти экстремумов принимали за оценку порога.

В течение одной экспериментальной сессии определяли одно значение порога при некоторых параметрах сигналов. В последовательных сессиях определяли пороги для всех соотношений параметров сигналов.

На каждом испытуемом было выполнено три измерения для каждого из варьируемых параметров сигналов. Например, при определении влияния шумовых помех на различение частотного сдвига, на каждом испытуемом было выполнено по три измерения при каждом соотношении интенсивностей помехи и тест-сигнала, для каждого положения полосы помехи на частотной шкале, и для каждой интенсивности тест-сигнала.

Статистическую обработку проводили в программе Statistica 8. Для сравнения нескольких групп данных использовали дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим post-hoc тестом.

5. Результаты

Основная задача данной работы состояла в исследовании влияния маскирующего шума на различение сложных спектров звукового сигнала (сдвиг гребенчатых спектров). Однако чувствительность к сдвигам гребенчатых спектров в отсутствие маскирующего шума также не была известна до выполнения данного исследования. Поэтому работа состояла из двух этапов.

На первом этапе стояла задача исследовать зависимость различения частотного сдвига гребенчатого спектра звукового сигнала в отсутствие маскеров от следующих параметров тест-сигнала:

1. Плотности гребней спектра
2. Интенсивности звукового сигнала.
3. Центральной частоты спектра сигнала.
4. Ширины гребней спектра.

Второй этап заключался в исследовании влияния маскирующего шума (маскера) на различение частотного сдвига гребенчатого спектра звукового сигнала. В этой части работы было протестировано влияние трёх положений маскера на частотной шкале относительно спектра тест-сигнала: маскер ниже по частоте, чем тест-сигнал на одну октаву; частотные полосы маскера и тест-сигнала совпадают; маскер выше по частоте, чем спектр тест-сигнала на одну октаву.

5.1. Зависимость различения сдвига фазы гребенчатого спектра звукового сигнала от параметров тест-сигнала в отсутствии маскеров

5.1.1. Зависимость порога сдвига фазы от плотности гребней спектра и интенсивности сигнала

В данной серии измерений использовали звуковой сигнал интенсивностью от 60 до 90 дБ УЗД с шагом 10 дБ. Спектр сигнала был центрирован на частоте 2 кГц, данная частота изначально была выбрана, т.к. была оптимальной при исследовании частотной разрешающей способности слуха. Плотность гребней спектра варьировали от 1.4 цикл/окт до максимально возможной для различения частотного сдвига.

Минимальный различимый сдвиг фазы спектра наблюдался при средних значениях плотности гребенчатого спектра (от 2 до 5 цикл/окт) и составлял около 1%. Как с повышением, так и с понижением плотности гребней спектра, порог увеличивался при всех значениях интенсивности сигнала ($p < 0.05$). Наибольшее значение порогов наблюдалось при самой низкой и самой высокой плотности: 1.4 и 7 цикл/окт (рисунок 17) и составляло в среднем 2%.

Интенсивность тест-сигнала не оказывала значительного влияния на порог различения частотного сдвига. Достоверное изменение порога было выявлено только при максимальной интенсивности в 90 дБ и только для плотности 1.4 и 2 цикл/окт. Более явно это можно продемонстрировать, если представить порог как функцию от интенсивности, принимая плотность гребней спектра в качестве параметра (рис. 18). При аппроксимации линиями регрессии графики для всех интенсивностей не имеют статистически достоверного наклона. Следует отметить, что при интенсивности тест-сигнала в 90 дБ, некоторые испытуемые могли различать сдвиг фазы гребенчатого спектра при плотности 7.7 и 9 цикл/окт, но поскольку при этих плотностях не все испытуемые могли различать даже максимально возможный сдвиг фазы, измерения на этих плотностях не могли быть выполнены на всей группе испытуемых и поэтому не могли быть включены в общую статистику. Обобщённые данные на рис. 18 приведены только для плотностей до 7 цикл/окт.

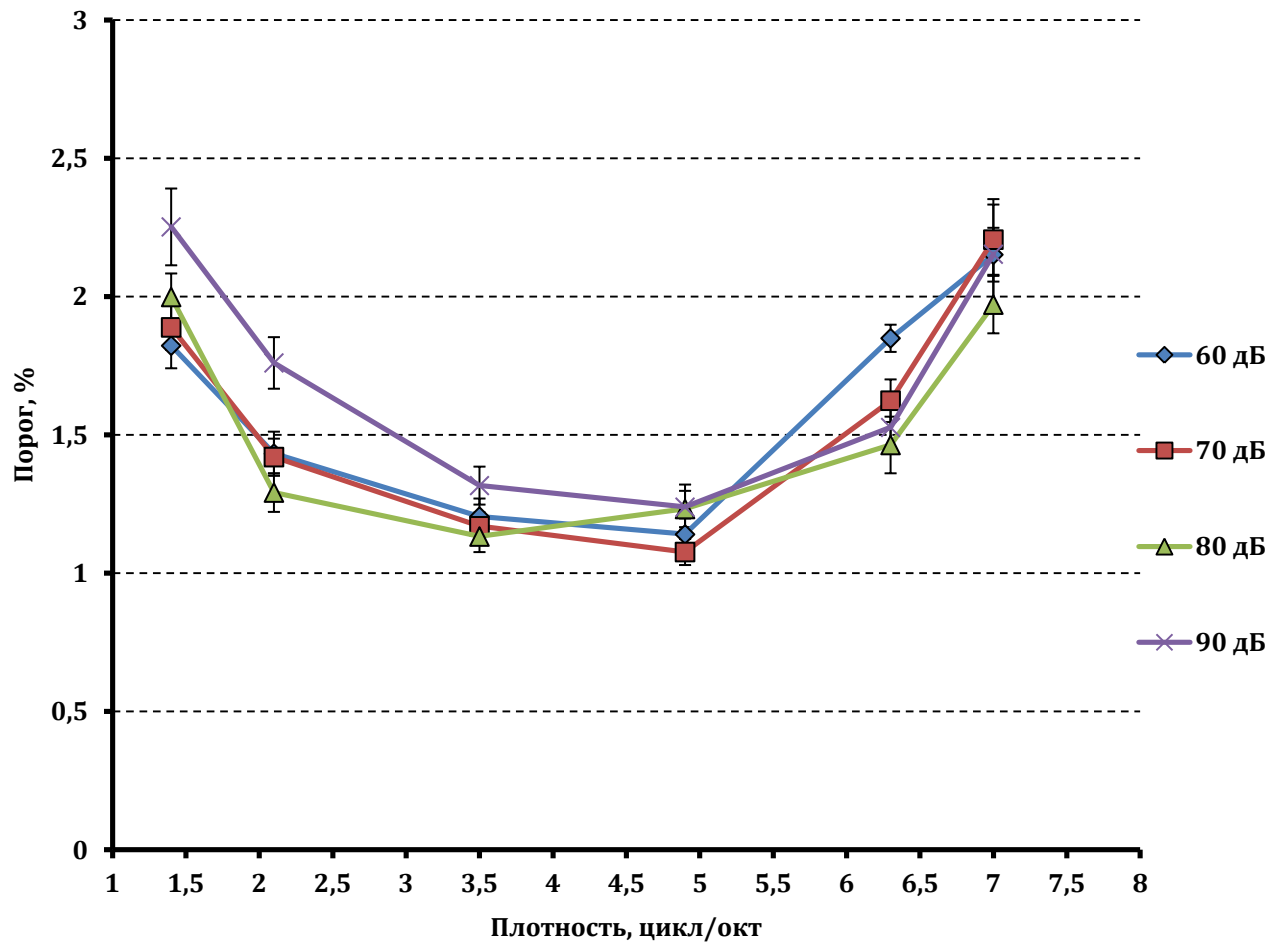


Рис. 17. Зависимость различения частотного сдвига спектра сигнала от плотности гребней спектра при интенсивности сигнала от 60 до 90 дБ. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешности соответствуют стандартной ошибке.

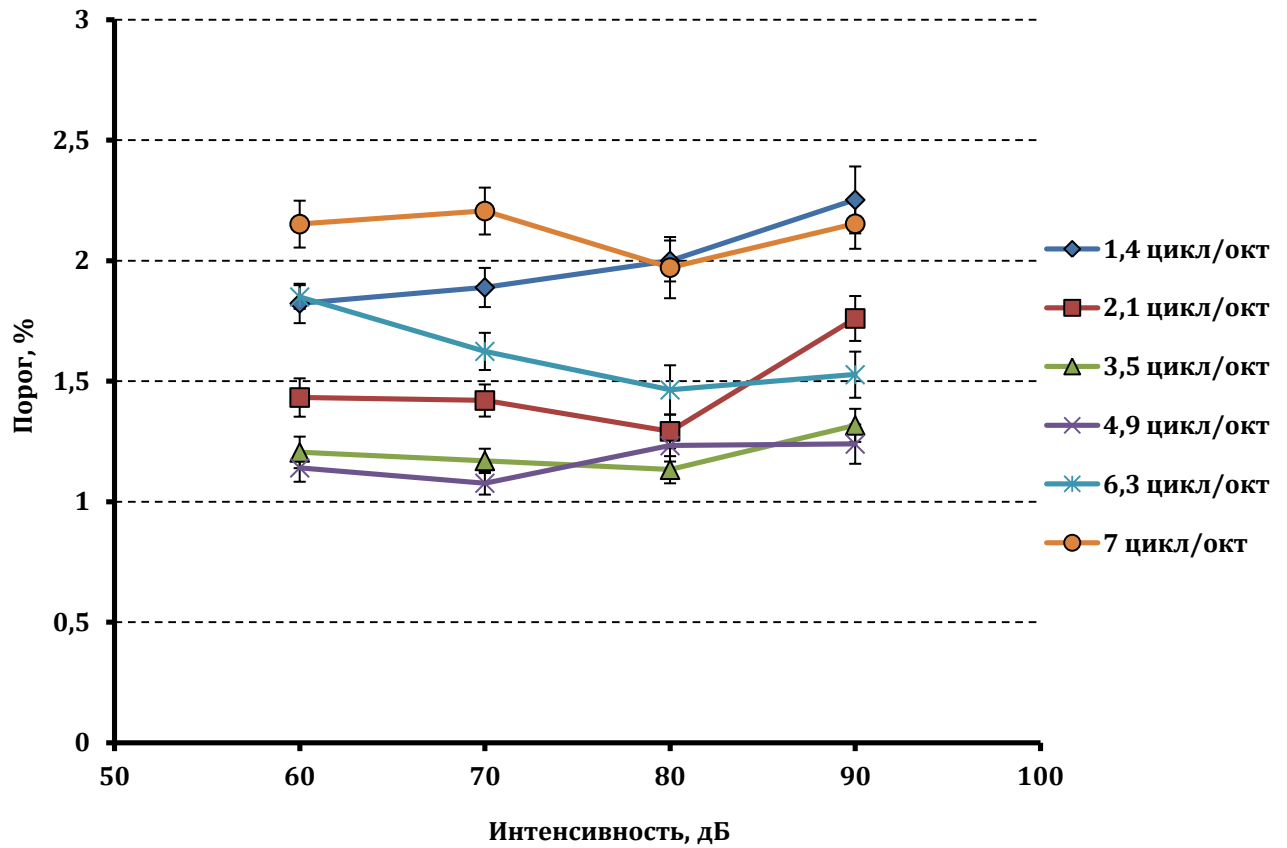


Рис. 18. Зависимость различия частотного сдвига гребенчатого спектра тест-сигнала от интенсивности сигнала при плотности от 1.4 до 7 цикл/окт. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешностей соответствуют стандартным ошибкам.

На рисунке 19 представлено комбинированное влияние обоих параметров - интенсивности сигнала и плотности гребней спектра - на пороги различения частотного сдвига в виде трёхмерного графика. График демонстрирует минимальные пороги при оптимальной (3-5 цикл/окт) плотности при незначительной зависимости от интенсивности сигнала.

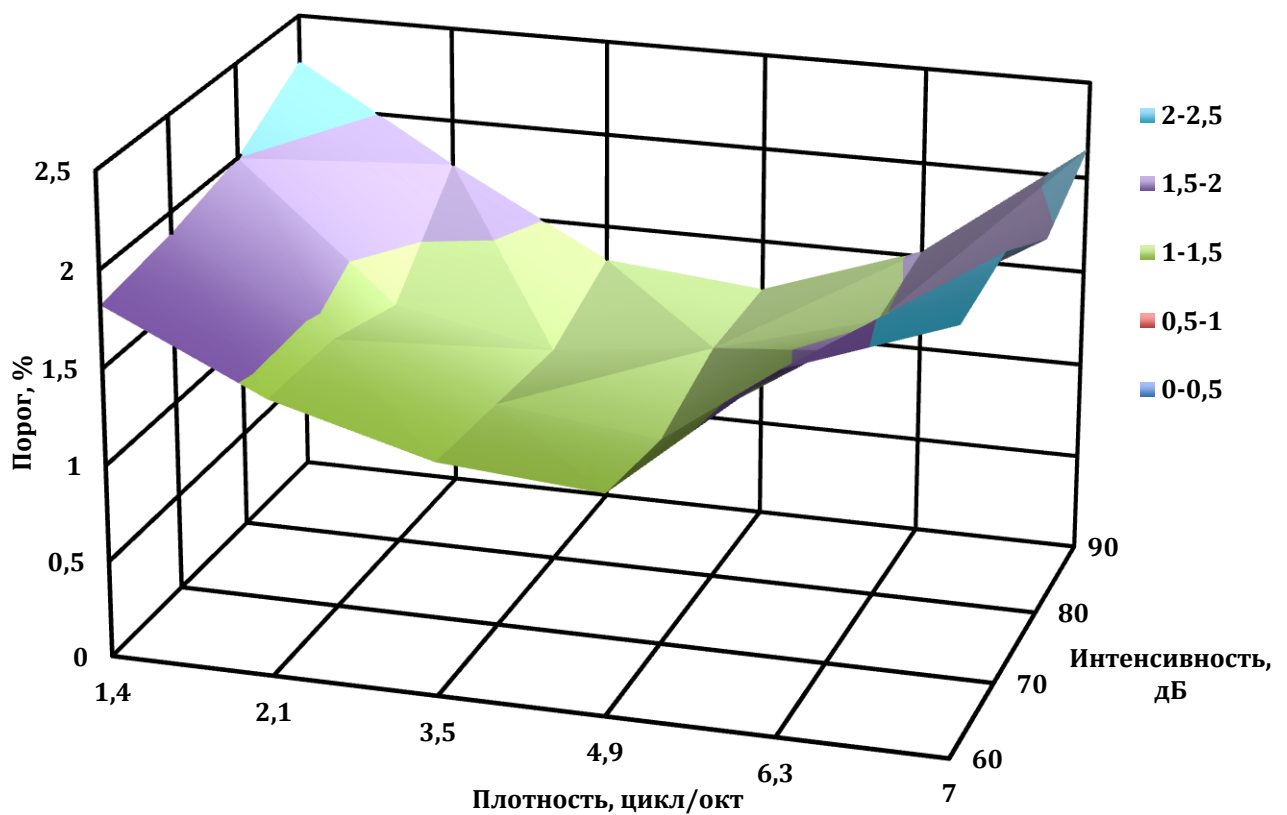


Рис. 19. Зависимость различения частотного сдвига гребенчатого спектра сигнала от плотности гребней спектра и интенсивности сигнала. Цвет в легенде отражает величину порога.

5.1.2. Зависимость порога сдвига фазы от плотности гребенчатого спектра и центральной частоты сигнала

Характер зависимости порога различения сдвига фазы от плотности рисунка гребенчатого спектра был протестирован на частотах от 0.5 до 8 кГц. Уровень тест-сигнала составлял 70 дБ УЗД, данное значение было выбрано испытуемыми как наиболее комфортное. Также как и в предыдущей серии, плотность гребней спектра изменяли от 1.4 цикл/окт. до максимальной доступной для различения.

На частоте 1 кГц минимальное значение порогов наблюдалось при плотности от 1.4 до 5 цикл/окт и составляло в среднем 1.5%, статистически достоверных различий между значениями порогов в этом диапазоне выявить не удалось ($p > 0.05$) (Рисунок 20). Увеличение плотности гребенчатого спектра на данной частоте приводило к увеличению порога; максимального значения порог достигал при плотности 7 цикл/окт и составлял $2.6 \pm 0.69\%$ (значение \pm стандартное отклонение).

На частоте 2 кГц порог достигал максимального значения как при плотности 1.4 цикл/окт, так и при 7 цикл/окт; между собой эти значения порога статистически достоверно не отличались и составляли $1.9 \pm 0.4\%$. Пороги при плотности от 2 до 6.3 цикл/окт статистически достоверно не различались, и значения порога колебались от 1.2 до 1.4%. При центральной частоте тест-сигнала в 4 и 8 кГц удалось выявить только значение максимума и минимума порога в зависимости от плотности гребенчатого спектра. Как при частоте 4 кГц, так и при частоте 8 кГц максимальное значение порога наблюдалось при плотности 1.4 цикл/окт, а минимальное при плотности 5 цикл/окт.

При частоте 0.5 кГц испытуемые могли различить фазовый сдвиг спектра только при плотности не выше 5 цикл/окт, где порог составлял $4 \pm 0.9\%$. При этом минимальное значение порога составляло $2 \pm 0.8\%$ при плотности 3.5 цикл/окт. Пороги для всех значений плотности гребней спектра, при которых доступно различение частотного сдвига, были выше, чем на остальных частотах.

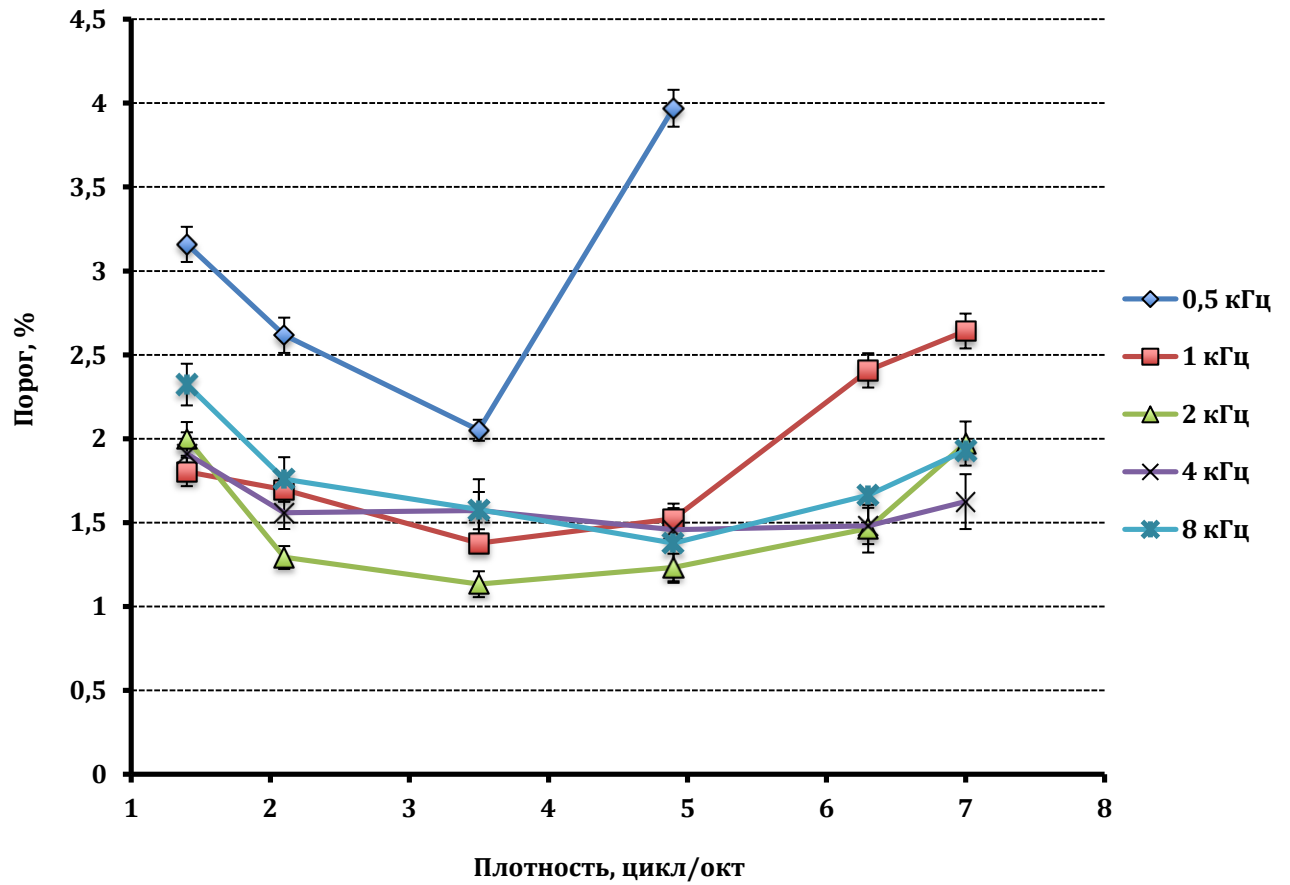


Рис. 20. Зависимость порога различения частотного сдвига спектра сигнала от плотности гребней спектра при центральной частоте от 0.5 до 8 кГц. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешности соответствуют стандартной ошибке.

На рисунке 21 представлена зависимость порогов различения частотного сдвига как функция от центральной частоты спектра для различных плотностей гребенчатого спектра. На центральной частоте 0.5 кГц при всех значениях плотности гребней пороги были выше, чем на остальных частотах ($p < 0.05$). На частотах от 1 кГц к 8 кГц при плотности гребней 1.4 цикл/окт наблюдался незначительный подъём порогов по сравнению с более высокими значениями плотности: от $1.8 \pm 0.5\%$ до $2.3 \pm 0.6\%$ ($p < 0.01$). При плотности 2 цикл/окт минимальное значение порогов смещалось к 2 кГц и составляло $1.3 \pm 0.3\%$, против $1.7 \pm 0.5\%$ на частоте 1 кГц, значения достоверно отличались ($p < 0.05$). В диапазоне частот от 2 кГц до 8 кГц наблюдался также незначительный подъём порогов с повышением частоты: от $1.3 \pm 0.3\%$ на 2 кГц до $1.8 \pm 0.5\%$ на 8 кГц ($p < 0.05$). При оптимальной плотности 3.5 цикл/окт порог достигал минимального значения на центральных частотах 1 и 2 кГц, далее, с повышением частоты до 4 кГц, следовал незначительный рост порога ($p < 0.05$). При плотности 5 цикл/окт достоверных различий между порогами на центральных частотах от 1 до 8 кГц обнаружено не было. Дальнейшее увеличение плотности гребенчатого спектра приводило не только к потере различения на частоте 0.5 кГц, но и к резкому росту порогов на частоте 1 кГц. Пороги при плотности 6.3 и 7 цикл/окт на частоте 1 кГц составляли $2.4 \pm 0.8\%$ и $2.6 \pm 0.7\%$ и были достоверно выше порогов для частот от 2 до 8 кГц ($p < 0.001$). Различия между порогами для центральных частот гребенчатого спектра от 2 до 8 кГц обнаружено не было.

Также как и для предыдущей серии, комбинированное влияние плотности спектра и центральной частоты сигнала на пороги, можно удобно продемонстрировать трёхмерным графиком – рисунок 22.

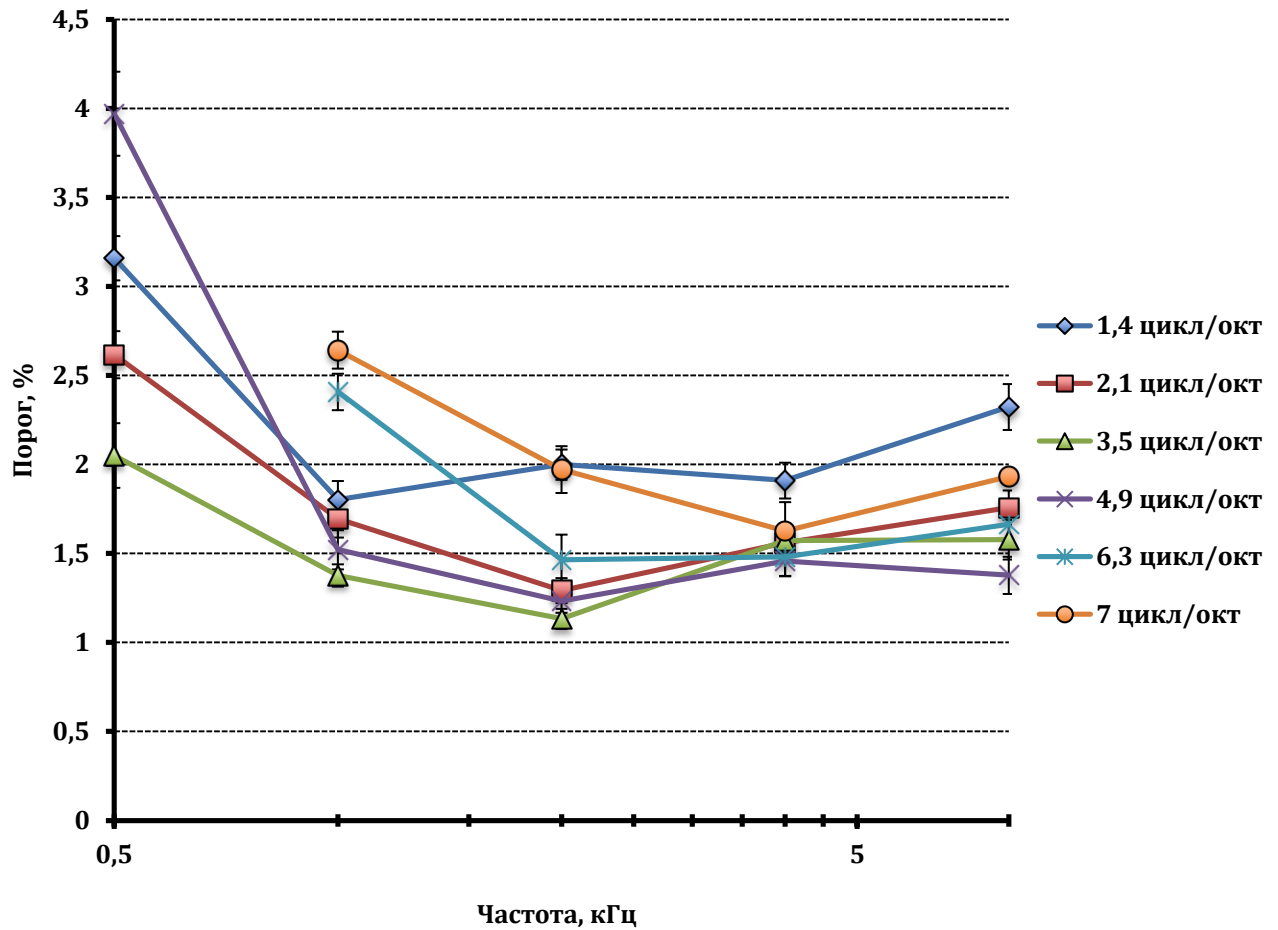


Рис. 21. Зависимость различения частотного сдвига гребенчатого спектра сигнала от центральной частоты сигнала при плотности от 1,4 до 7 цикл/окт. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешностей соответствуют стандартным ошибкам.

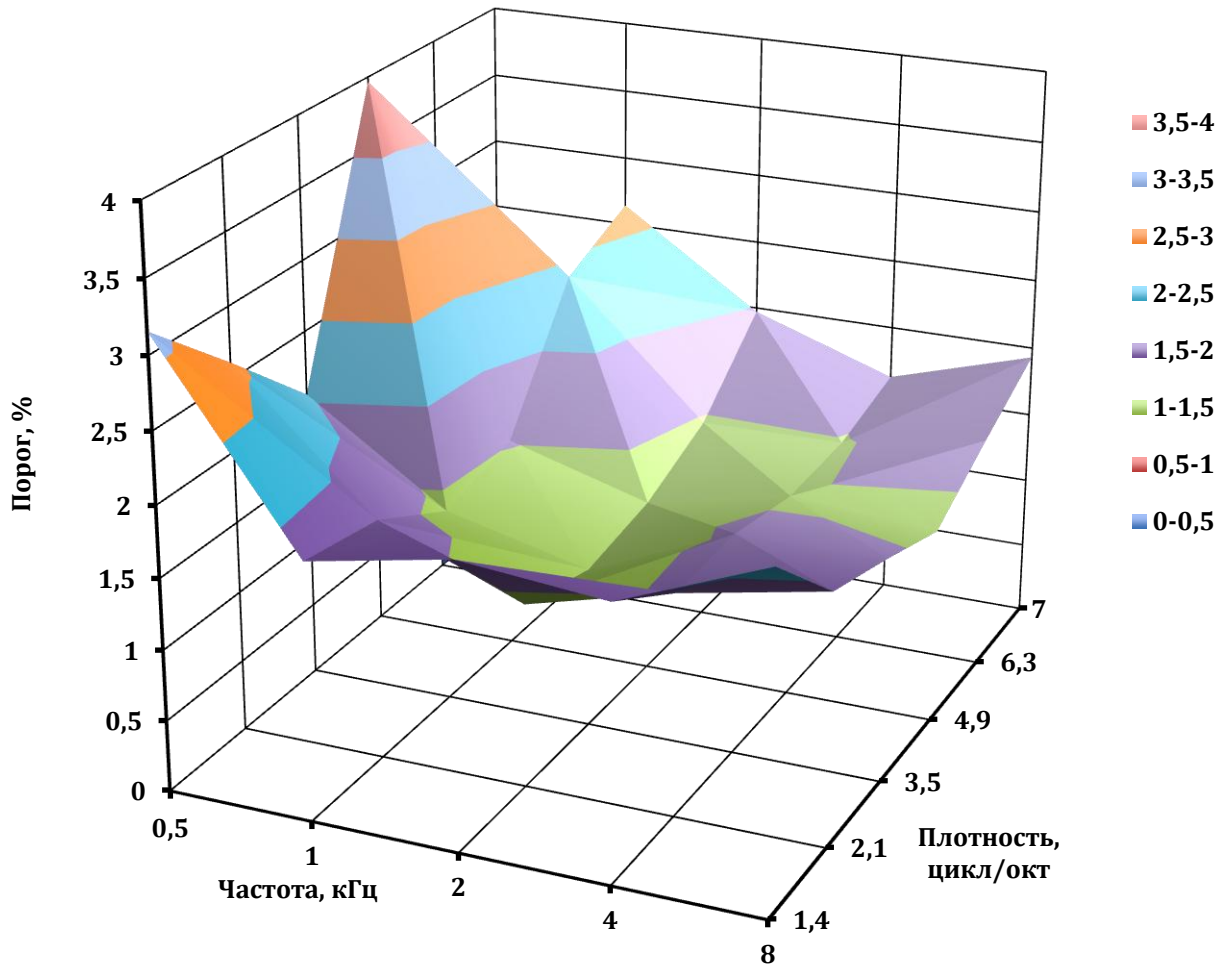


Рис. 22. Зависимость различия частотного сдвига гребенчатого спектра сигнала от центральной частоты и плотности гребней спектра. Цвет в легенде отражает величину порога.

5.1.3. Зависимость порогов различения фазового сдвига гребенчатого спектра от ширины гребней спектра

В данной серии экспериментов чувствительность к сдвигам спектрального рисунка исследовалась в зависимости от двух переменных – плотности и ширины гребней спектра – в двух комбинациях.

В первой серии экспериментов при некоторой плотности гребней спектра варьировали ширину гребней. Ширина гребней выражалась в процентах от интервала между гребнями и изменялась от 50% («стандартная» косинусоидальная форма гребней, при которой ширина гребней частотно пропорциональна) до 20% (узкие гребни спектра). Такое варьирование ширины проводили при плотностях от 1.4 цикл/окт до 7 цикл/окт. Центральная частота спектра составляла 2 кГц, а интенсивность сигнала 70 дБ.

Полученные результаты показаны на рисунке 23. При плотностях 1.4, 2.1, 4.9 и 7 цикл/окт порог достоверно возрастал с увеличением ширины гребней спектра начиная с ширины гребней, составляющей 25% от интервала между гребнями ($p < 0.05$). При плотности 3.5 цикл/окт наблюдалось увеличение порогов начиная с ширины гребней 37% ($p < 0.001$). При плотности гребней спектра 6.3 цикл/окт также наблюдался рост порогов, порог при минимальной ширине гребней (20%) достоверно отличался от такового при максимальной ширине (50%) ($p < 0.01$). Кроме того, при максимальном сужении гребней спектра некоторые испытуемые были способны различать сдвиг спектра при плотности в 7.7 и 8.4 цикл/окт.

Во второй серии экспериментов порог различения частотного сдвига измеряли как функцию от плотности гребней спектра для разной ширины гребней спектра. Но при этом ширина гребней не зависела от плотности спектра и была постоянна в % от центральной частоты. Ширину изменяли от 3.5 до 14 % (чем больше значение, тем шире гребни). Измерения также проводили при центральной частоте сигнала 2 кГц и интенсивности сигнала 70 дБ.

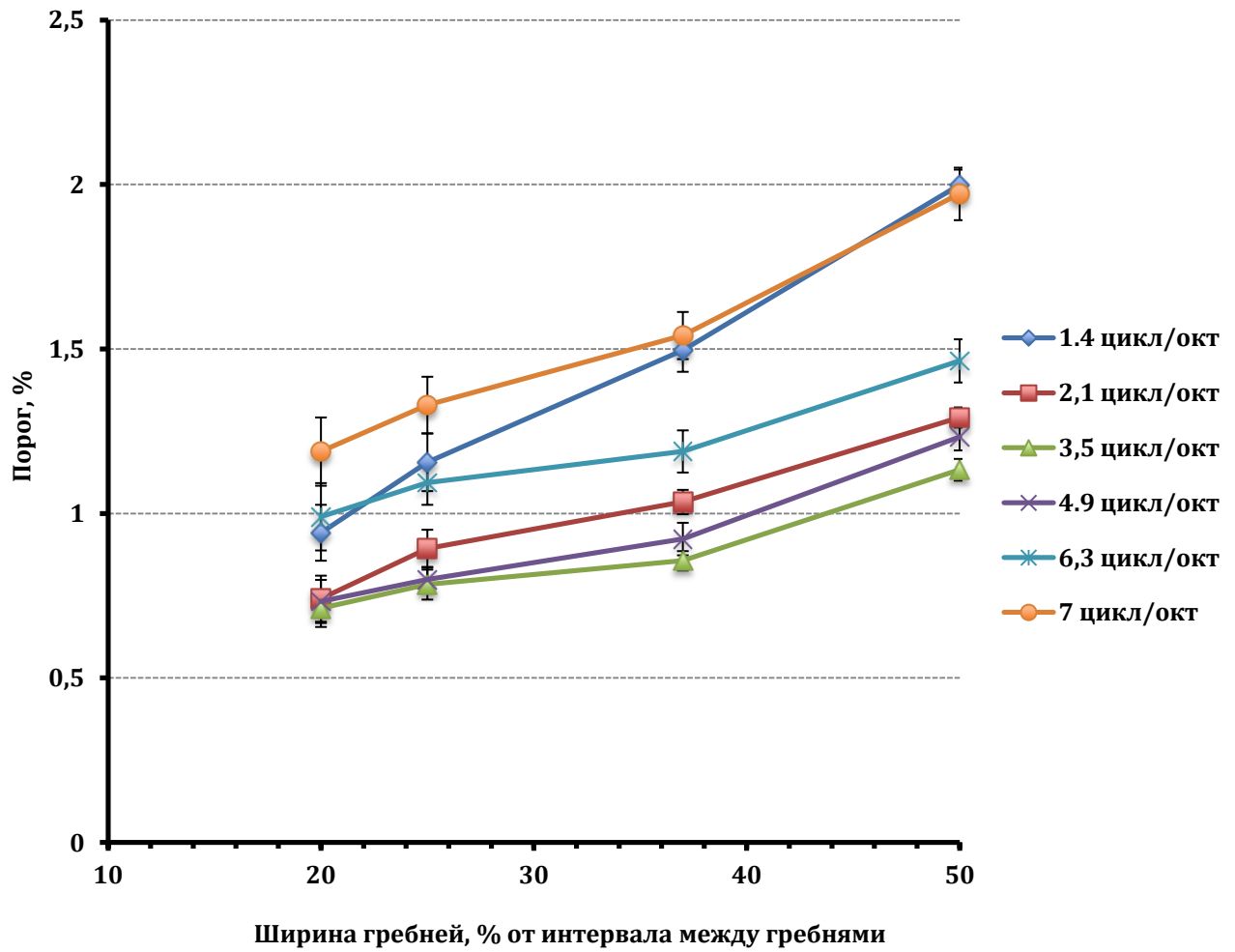


Рис. 23. Зависимость порогов различения частотного сдвига гребней спектра от ширины гребней при различной плотности гребней, от 1.4 до 7 цикл/окт. Приведены средние значения по всем измерениям и стандартные ошибки среднего.

Результаты представлены на рисунке 24. Для сравнения представлена кривая зависимости порогов от плотности для косинусоидальной формы гребней (пунктирная линия). За значения, где гребни спектра принимали косинусоидальную форму, функцию не продолжали.

В отличие от косинусоидальной формы гребней спектра, при постоянной ширине гребней снижение плотности спектра приводило к снижению порогов различения частотного сдвига. Такое снижение было статистически достоверным для ширины от 3.5 до 10% ($p < 0.001$ для 3.5 - 7% и $p < 0.01$ для 10%). Исключение составило только максимальное значение ширины 14%, данная функция содержала только две точки 1.4 цикл/окт и 2 цикл/окт, между которыми достоверных различий обнаружено не было. При сужении гребней спектра от 3.5 до 7% пороги различения опускались до 0.7%, когда плотность гребней составляла от 2 до 5 цикл/окт.

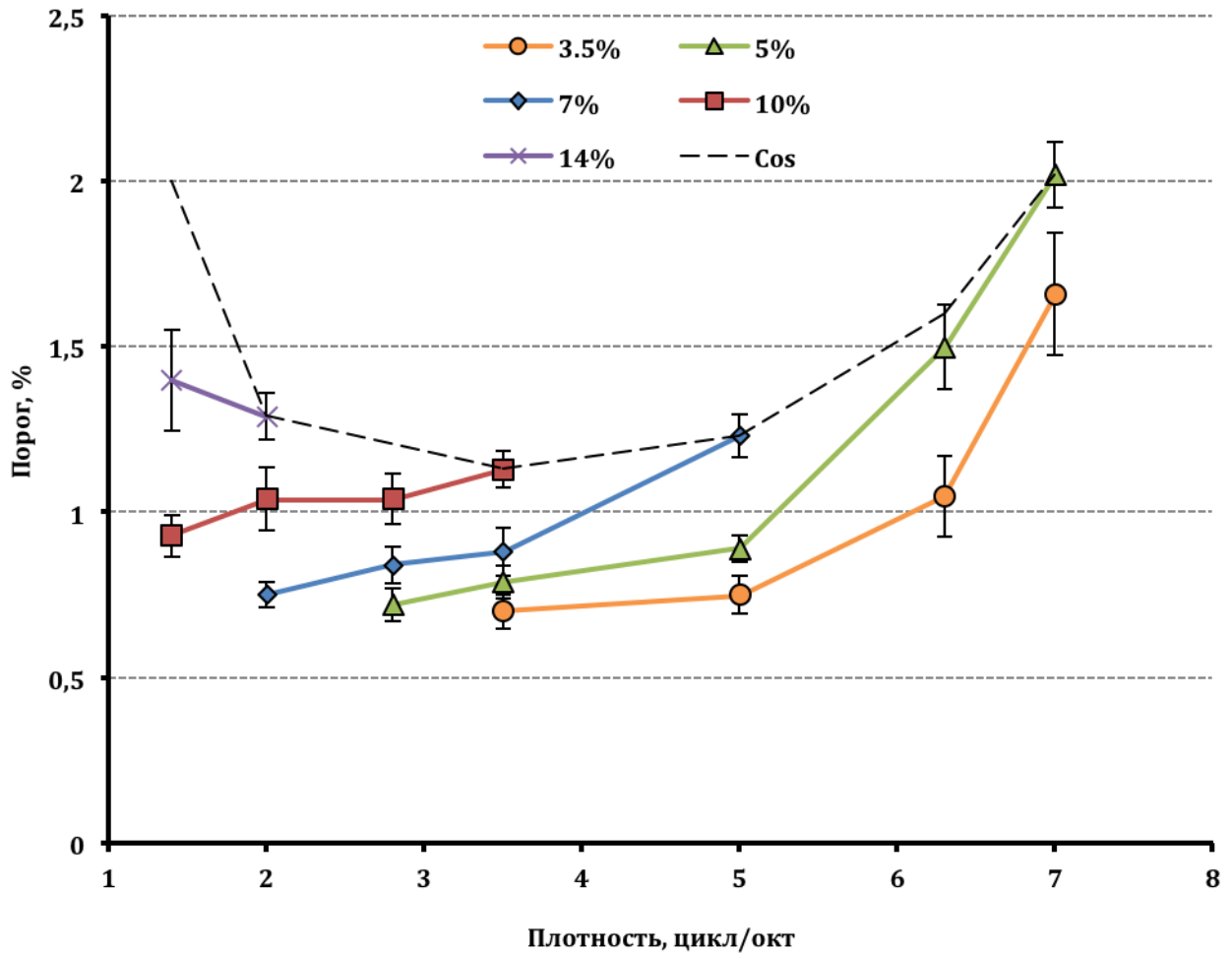


Рис. 24. Зависимость порогов различения частотного сдвига гребней спектра от плотности гребней при различных значениях ширины гребней, от 3.5 до 14% от центральной частоты. Cos – зависимость при косинусоидальной форме гребней спектра. Приведены средние значения по всем измерениям и стандартные ошибки среднего.

5.2. Влияние маскирующего шума на различия фазового сдвига гребенчатого спектра звукового сигнала

В этих исследованиях использовался тест-сигнал, центрированный на частоте 2 кГц и с плотностью гребенчатого спектра 3.5 цикл/окт; при таких параметрах значение порога различения немаскированного частотного сдвига минимально.

Проанализированные в работе комбинации интенсивностей маскирующего шума и тест-сигнала суммированы в таблице 1.

Таблица 1. Исследованные комбинации параметров тест-сигнала и маскера.

	Низкочастотный маскер	Совпадающий маскер	Высокочастотный маскер
Тест-сигнал 50 дБ УЗД	Интенсивность маскера от 30 до 100 дБ		
Тест-сигнал 80 дБ УЗД	Интенсивность маскера от 60 до 100 дБ		

5.2.1. Маскировка при интенсивности тест-сигнала 50 дБ УЗД

Влияние маскера на различение частотного сдвига гребенчатого спектра было протестировано в трёх случаях: низкочастотный маскер, совпадающий (по частоте) маскер, высокочастотный маскер. Интенсивность маскера варьировали от 30 до 100 дБ УЗД, т.е. соотношение интенсивностей маскер/тест-сигнал варьировали в пределах от -20 до 50 дБ. В качестве контроля служил порог различения в отсутствие шума; этот порог составлял $1 \pm 0.2\%$ от частоты (минимально различаемое изменение фазы гребенчатого спектра при плотности 3.5 цикл/окт, центральной частоте 2 кГц и интенсивности тест-сигнала 50 дБ).

Результаты представлены на рисунке 25. Наибольший эффект маскировки, выражающийся в повышении порогов обнаружения сдвига гребенчатой структуры спектра, был получен при использовании маскера, совпадающего по частоте со спектром сигнала. При таких условиях достоверное повышение порогов наблюдалось начиная с интенсивности маскера в 50 дБ УЗД (соотношение маскер/сигнал при этом

составляло 0 дБ) ($p < 0.05$), порог составлял $2.3 \pm 0.8\%$. Увеличение интенсивности маскира ещё на 5 дБ (соотношение маскер/тест-сигнал 5 дБ) приводило к значительному повышению порога до $4.6 \pm 1\%$. Дальнейшее повышение интенсивности маскира ещё на 5 дБ приводило к полной потере различения сдвига гребенчатого спектра, т.е. полная маскировка тест-сигнала наступала при интенсивности маскира 60 дБ (соотношение маскер/сигнал 10 дБ).

При низкочастотной маскировке кривая зависимости порога от интенсивности маскира была более плавной. При увеличении интенсивности маскира от 30 до 70 дБ УЗД (соотношение маскер/сигнал от -20 до 20 дБ) порог различения не изменялся по сравнению с контролем. Повышение уровня маскирующего шума на 10 дБ приводило к повышению порога до $2 \pm 0.72\%$. При уровне маскира 85 дБ УЗД порог составлял $3.6 \pm 1.8\%$ против $1 \pm 0.2\%$ без воздействия маскирующего шума. Полная потеря способности различать частотный сдвиг спектрального рисунка наступала при интенсивности маскира 90 дБ УЗД (соотношение маскер/сигнал 40 дБ). При таких условиях лишь двое испытуемых в трёх повторах из шести были способны выделять частотный сдвиг, порог составлял от 5% до 7%. При интенсивности маскирующего шума в 100 дБ ни один испытуемый не мог обнаружить частотный сдвиг гребенчатого спектра. Достоверное повышение порогов при низкочастотной маскировке наблюдалось начиная с соотношения маскер/сигнал 30 дБ ($p < 0.05$).

При высокочастотной помехе эффект воздействия маскирующего шума был незначительный. Достоверное повышение порога было получено только при интенсивности маскира в 90 дБ УЗД (отношение маскер/сигнал 40 дБ), порог составлял $1.6 \pm 0.7\%$ против $1 \pm 0.2\%$ в контроле. При интенсивности маскира в 100 дБ УЗД порог повышался до $2 \pm 0.8\%$. Более высокую интенсивность маскира не использовали, поскольку она оценивалась испытуемыми как дискомфортная.

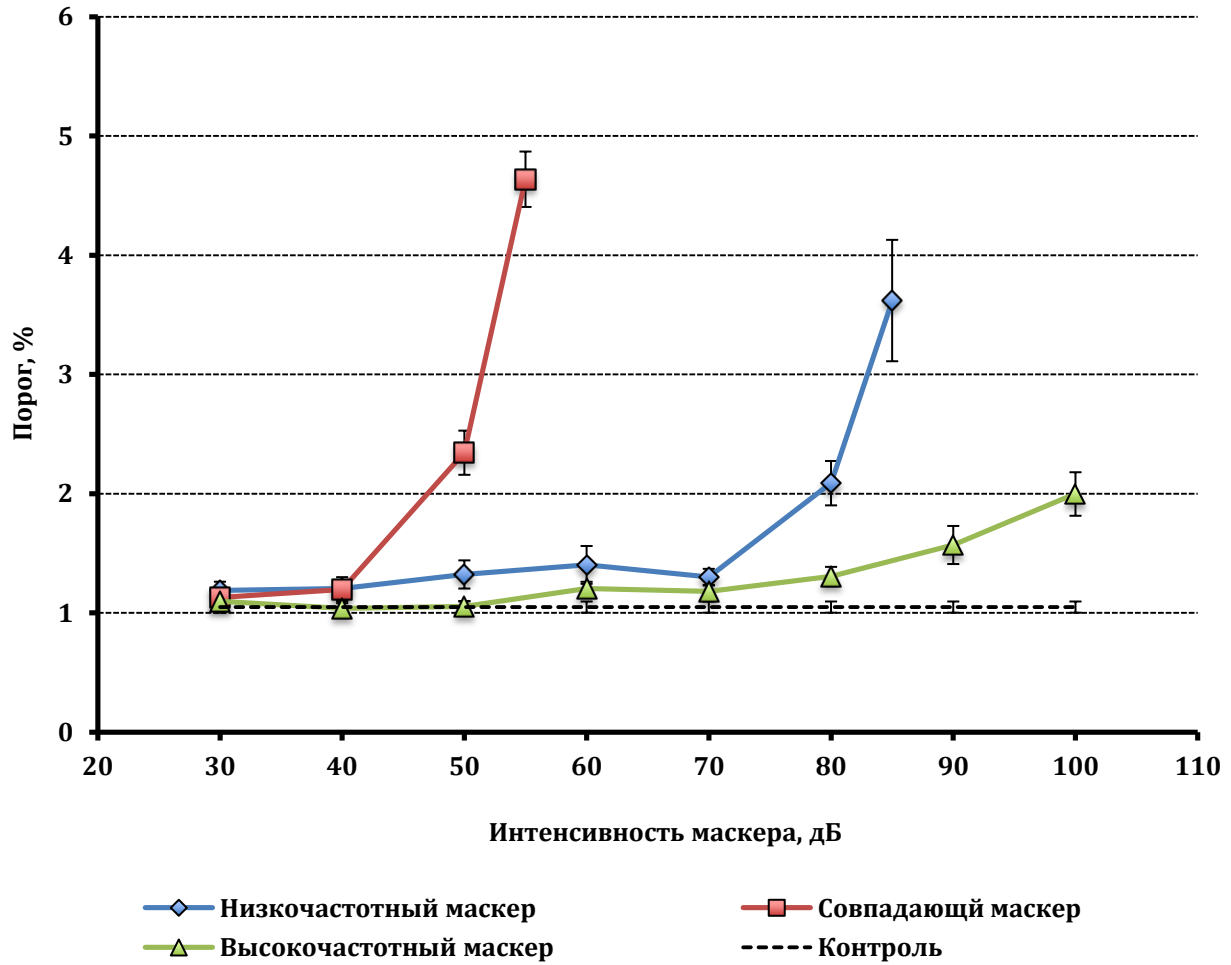


Рис. 25. Зависимость порогов различения частотного сдвига гребенчатого спектра от интенсивности маскира для тест-сигнала интенсивностью 50 дБ УЗД при трёх положениях частотной полосы маскира относительно полосы тест-сигнала. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешностей – стандартные ошибки. Контроль – значение порогов в отсутствии маскирующего шума.

5.2.2. Маскировка при интенсивности сигнала 80 дБ УЗД

При интенсивности сигнала 80 дБ УЗД также использовали три положения маскера: низкочастотный маскер, совпадающий маскер и высокочастотный маскер. Интенсивность маскера варьировали от 60 до 100 дБ УЗД (отношение маскер/тест-сигнал от -20 до 20 дБ). Порог различения частотного сдвига гребенчатого спектра в отсутствии шумовой помехи составлял $1.13 \pm 0.26\%$.

Результаты представлены на рисунке 26. Так же, как при интенсивности тест-сигнала 50 дБ, наиболее сильное воздействие оказывал маскер, совпадающей по частоте с тест-сигналом. При интенсивности маскера 80 дБ УЗД (отношение маскер/сигнал 0 дБ) порог увеличивался до $3.3 \pm 1.3\%$ против $1.13 \pm 0.26\%$ в отсутствие помехи. Дальнейшее повышение интенсивности маскера приводило к резкому увеличению порога: при интенсивности маскера 85 дБ УЗД (отношение маскер/сигнал 5 дБ) порог составлял уже $6.7 \pm 1.3\%$, а двое испытуемых были неспособны различать частотный сдвиг. Когда интенсивность маскера достигала 90 дБ УЗД (отношение маскер/сигнал 10 дБ), происходила полная потеря способности к различению частотного сдвига гребенчатого спектра.

Когда маскер располагался на частотной шкале ниже тест-сигнала, эффект маскировки нарастал более плавно. Достоверное увеличение порогов при низкочастотном маскере наблюдалось начиная с интенсивности маскера 70 дБ (отношение маскер/сигнал -10 дБ) ($p < 0.05$), при этом порог составлял $1.5 \pm 0.5\%$. Значительный эффект наблюдался начиная с интенсивности маскера 85 дБ (отношение маскер/сигнал 5 дБ), при этом порог возрастал в два раза и составлял $2.5 \pm 1.7\%$. При интенсивности маскера 95 дБ (отношение маскер/сигнал 15 дБ) двое испытуемых теряли способность различать частотный сдвиг гребенчатого спектра. Для остальных средний порог составлял $5.4 \pm 2.3\%$. При интенсивности маскера 100 дБ (отношение маскер/сигнал 20 дБ) только один испытуемый был способен различить частотный сдвиг гребенчатого спектра, в этом случае порог составлял $7.3\% \pm 1\%$.

Высокочастотный маскер в данной серии так же, как и при интенсивности тест-сигнала 50 дБ, не оказывал заметного влияния на пороги: они достоверно не отличались от таковых в отсутствие помехи.

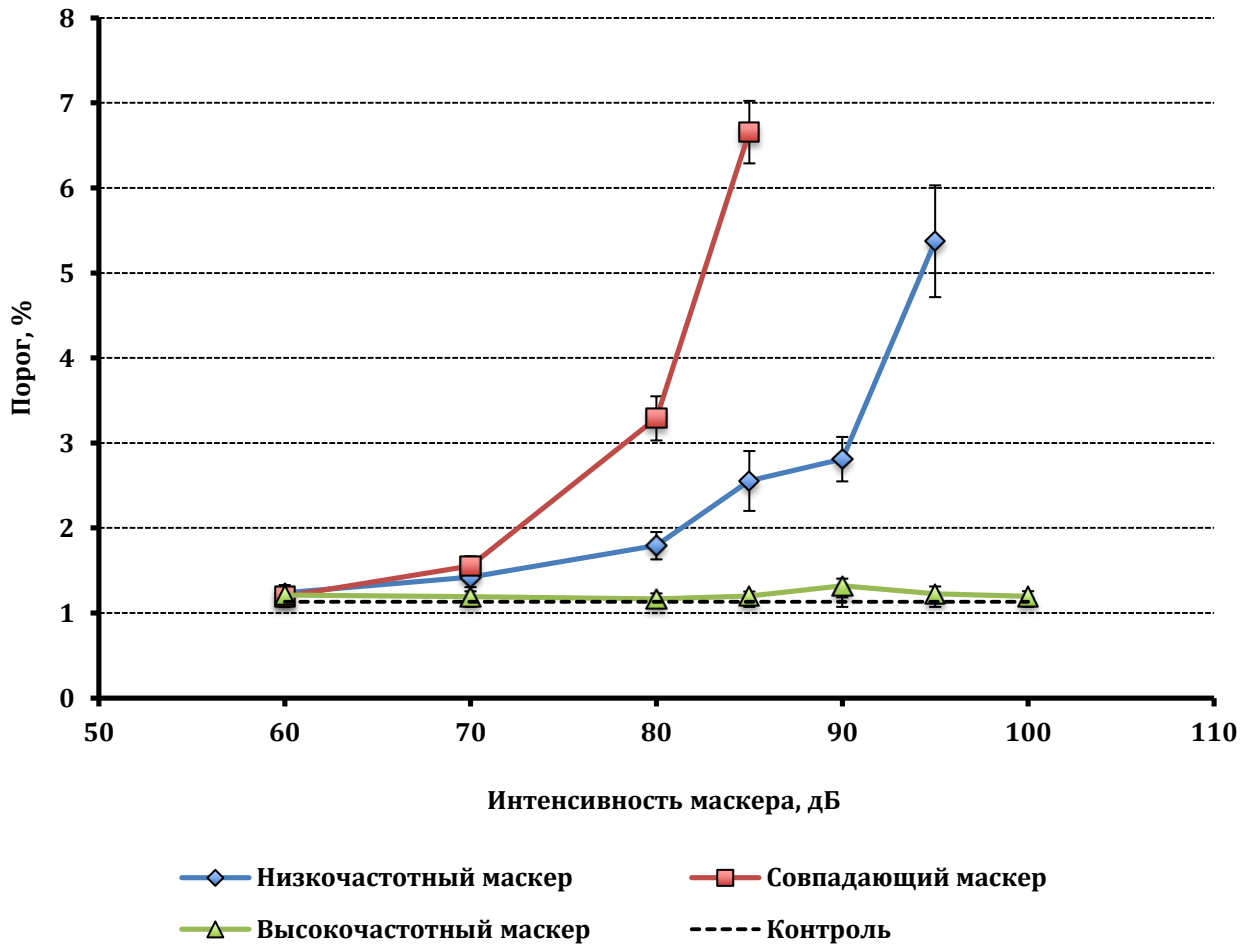


Рис. 26. Зависимость порогов различения частотного сдвига гребенчатого спектра от интенсивности маскира для тест-сигнала интенсивностью 80 дБ УЗД при трёх положениях частотной полосы маскира относительно тест-сигнала. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешностей – стандартные ошибки. Контроль – значение порогов в отсутствии маскирующего шума.

5.2.3. Сравнение характера маскировки при совпадающем и низкочастотном маскере

Приведённые выше данные показывают, что как совпадающий, так и низкочастотный маскеры эффективно подавляют различие частотного сдвига сложного спектра. Однако характер маскировки принципиально различается для совпадающего и низкочастотного маскера (Рис. 27).

При совпадающих по частоте тест-сигнале и маскере, как для тест-сигнала интенсивностью 50 дБ УЗД, так и для тест-сигнала 80 дБ УЗД, маскировка наступала при одинаковом отношении интенсивностей маскера и тест-сигнала. Чтобы сравнить две функции (без маскировки и на фоне маскера), мы измерили расстояние между кривыми на значениях, соответствующих порогам в 2, 3 и 4%. Если функции представить как зависимость от абсолютного значения интенсивности маскера в УЗД, то расстояние между кривыми составит 26, 27 и 27.5 дБ, соответственно (среднее расстояние 26.8 дБ). Если же график представить как зависимость от отношения интенсивностей маскера и тест-сигнала, то расстояние между кривыми составит всего 4, 3 и 2.5 дБ, соответственно (среднее расстояние 3.2 дБ) (Рисунке 27 А).

Иной характер имеет зависимость порогов различения частотного сдвига от интенсивности маскера при низкочастотной маскировке. В этом случае величина порога различения в большей степени зависела от абсолютных значений интенсивности маскера (УЗД), а не от отношения интенсивностей маскер/сигнал. Если представить зависимость изменения порога сначала от абсолютного значения интенсивности маскера, затем от соотношения интенсивностей маскер/сигнал, то в первом случае расстояние между кривыми составит 4 и 8 дБ для значений порогов 2 и 3% (среднее расстояние 6 дБ), а во втором случае 27.5 и 22 дБ (среднее расстояние 24.7 дБ) (Рисунке 27 Б).

Таким образом, приведённое сравнение показывает, что в случае совпадающих по частотной полосе маскере и тест-сигнале определяющую роль играет отношение интенсивности маскера и тест-сигнала: именно это отношение определяет эффект маскировки. Для низкочастотной маскировки основное значение имеет абсолютная интенсивность (УЗД) маскера.

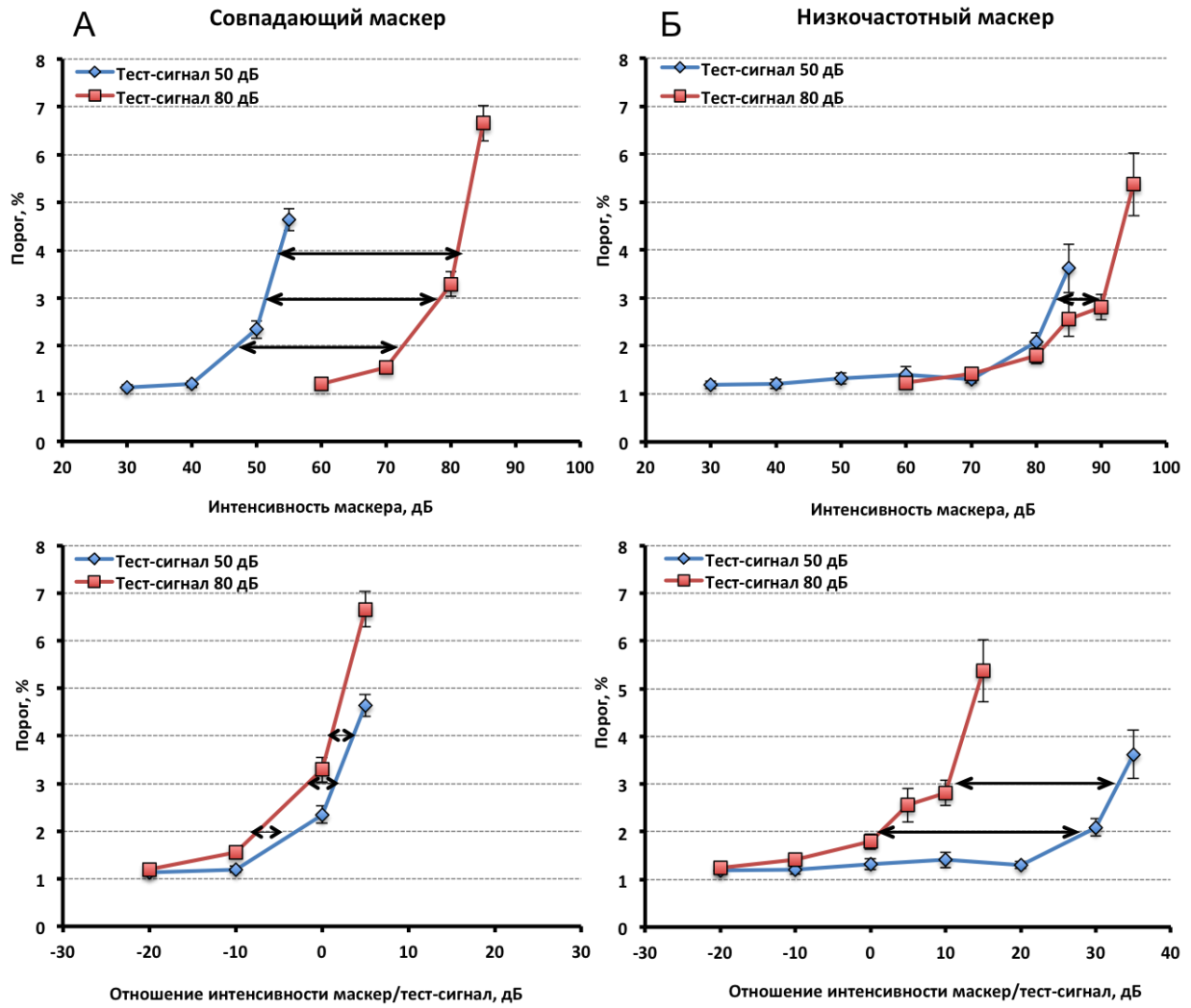


Рис. 27. Сравнение зависимости порогов сдвига гребенчатого спектра от абсолютного значения интенсивности маскира и отношения интенсивностей маскира/сигнал.

А – совпадающий маскер. Б – низкочастотный маскер. Планки погрешностей – стандартные ошибки. Стрелками показано расстояние между кривыми.

6. Обсуждение

6.1. Участие «частотного» и «временного» механизмов в различении сдвига фазы в звуковом сигнале с гребенчатым спектром

В соответствии с современными представлениями, изменения частотного сдвига спектра, как простых, так и сложных звуковых сигналов могут различаться благодаря участию двух механизмов:

1. Анализ по принципу места, т.е. на основе представительства звуковых частот в слуховой улитке по принципу места;
2. Анализ, основанный на временной структуре потока нервных импульсов, поступающих из улитки.

Условно эти два механизма обычно обозначаются как «частотный» и «временной», хотя и в том, и в другом случае процесс анализа может быть описан как в частотной, так и во временной шкале; различаются только физиологические процессы.

При исследовании порогов различения частотного сдвига простых сигналов – чистых тонов - было показано, что временной механизм может обеспечивать различение на низких частотах, до 4-5 кГц, и при низкой глубине модуляции сигнала, в то время как на высоких частотах и при высокой глубине модуляции работает частотный анализ по принципу места (подробно см. литературный обзор).

Есть основания считать, что для различения гребенчатого спектра с частотно-пропорциональными гребнями участие временного анализа сомнительно.

Шум с гребенчатой структурой спектра не имеет выраженной временной структуры, на основе которой может выполняться временной анализ. Однако такой шум имеет скрытую временную структуру, которая проявляется в его автокоррелограмме. Таким образом, временной анализ гребенчатого шума возможен только на основе его автокоррелограммы (Рисунок 28).

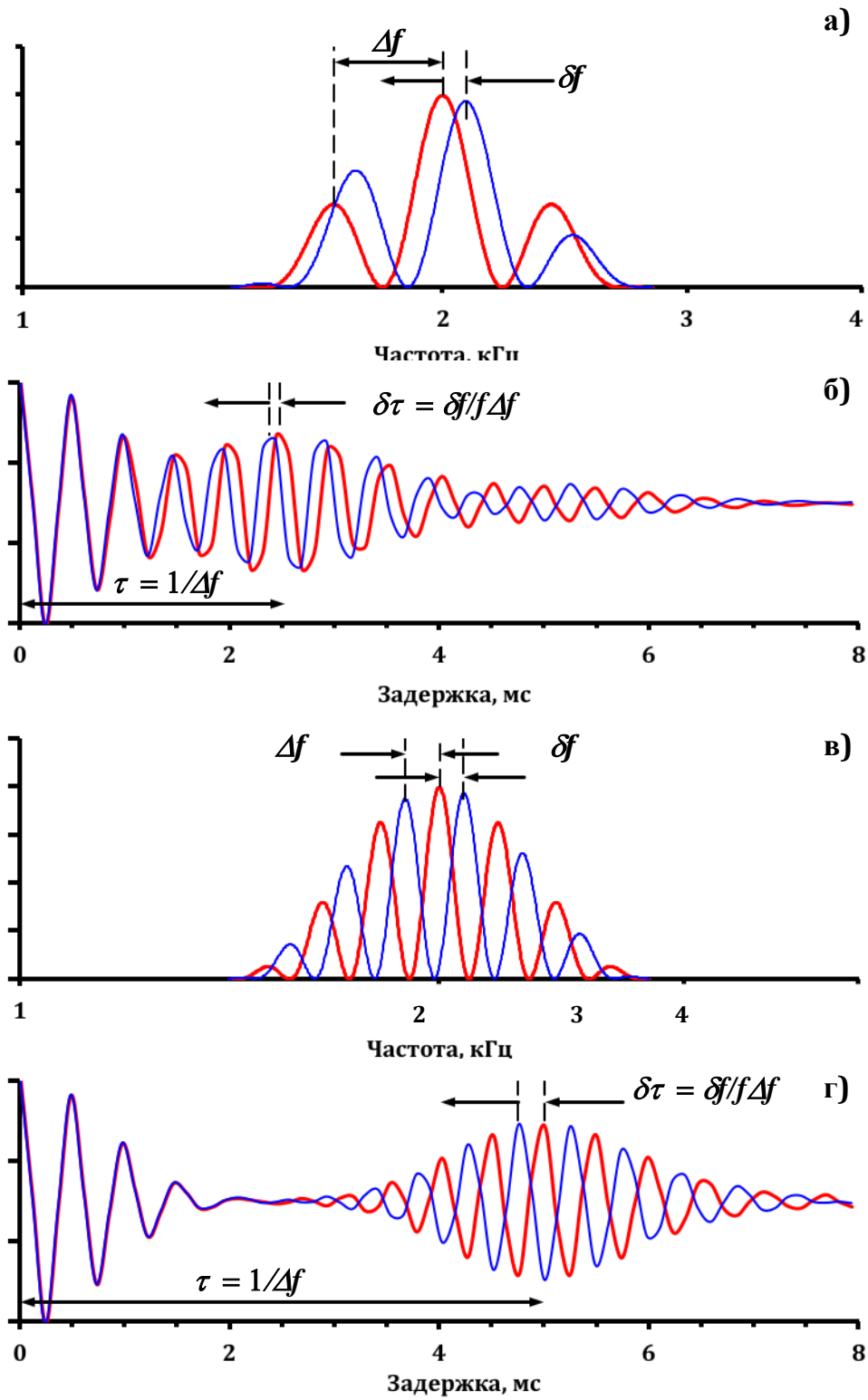


Рис. 28. Гребенчатые спектры сигналов (а, в) и их автокорреляционные функции (б, г). Красная и синяя линии - два сигнала, у которых гребенчатый рисунок спектра сдвинут один относительно другого по частотной шкале.

Автокоррелограмма гребенчатого спектра содержит два основных сегмента: начальный сегмент и его копия с некоторой задержкой

$$t = 1/\Delta f$$

где Δf – расстояние между гребнями спектра. Когда гребни спектра сдвигаются по частотной шкале на некоторую величину δf , происходит изменение задержки второго сегмента, но основная «макроструктура» автокоррелограммы остаётся неизменной (Рисунок 28).

Сдвиг сегмента с задержкой будет пропорционален частотному сдвигу гребней в спектре:

$$\delta t/t = \delta f/f$$

где δt - задержка внутри второго компонента, а f – центральная частота гребня спектра.

Можно предположить, что сдвиг гребенчатого спектра будет различаться до тех пор, пока δt или зависимость $\delta t/t$ не достигнет некоторого критического значения Cr .

Соответственно, если

$$Cr = \delta t$$

то

$$\delta f/f = Cr/t = Cr \cdot \Delta f$$

или, если

$$Cr = \delta t/t,$$

то

$$\delta f/f = Cr$$

Таким образом, пороги различения частотного сдвига должны быть либо пропорциональны расстоянию между гребнями спектра (т.е. монотонно изменяться с изменением плотности гребней), либо не зависеть от расстояния между гребнями. Но это предсказание временного анализа не согласуется с экспериментальными данными:

полученная зависимость различения частотного сдвига от плотности гребней спектра не была монотонной.

Кроме того, можно рассчитать изменения, происходящие в автокорреляционной функции при сдвиге гребней спектра сигнала по частотной шкале, но результаты такого расчёта плохо согласуются с реальными возможностями слуховой системы. Согласно нашим экспериментальным данным, минимальный порог различения составлял приблизительно 1% от центральной частоты спектра сигнала, при центральной частоте сигнала 2 кГц и плотности гребенчатого спектра 3.5 цикл/окт (5 отн.ед.). Как показано выше, задержка между двумя сегментами автокорреллограммы составляет $t = 1/\Delta f$, где Δf - расстояние между гребнями спектра. При центральной частоте 2 кГц и плотности гребней 5 отн.ед. расстояние между гребнями составит 0.4 кГц, т.к. $D = f/\Delta f$, где D - плотность и f - центральная частота спектра. Соответственно, задержка t между двумя сегментами автокорреллограммы составляет 2.5 мс. При сдвиге гребенчатого спектра по частотной шкале на 1%, расстояние между гребнями также изменится на 1%, т.к. гребни частотно пропорциональны. Следовательно, задержка между сегментами автокорреллограммы также изменится на 1% и составит 2.525 мс, т.е. изменение задержки составит всего 25 мкс. Таким образом, для обнаружения сдвига гребней спектра по сдвигу задержанного сегмента автокорреллограммы необходимо временное разрешение не хуже 25 мкс. Такое сверхвысокое временное разрешение в слуховой системе допускается для бинаурального анализа сигналов (определение направления на источник звука по интерауральной задержке), но при анализе структуры звуковых сигналов время интегрирования в слуховой системе человека обычно оценивается в единицы миллисекунд, т.е. на два десятичных порядка хуже, чем требуемое в соответствии с приведёнными вычислениями.

С другой стороны можно предположить, что детектируется изменение в пределах второго сегмента автокорреляционной функции (δt). Это изменение составляет:

$$\delta t = \delta f / f \cdot \Delta f,$$

где δf - частотный сдвиг гребенчатого спектра (т.к. центральная частота 2 кГц, сдвиг при значении 1% составит 0.02 кГц), Δf - частотный интервал между соседними

гребнями, а f – центральная частота спектра. Подставив значения, использованные в наших экспериментах, получаем:

$$\delta t = 0.02/2 \cdot 2.5 = 0.004 \text{ мс},$$

т.е. для различения сдвига гребней спектра по этому признаку требуется временное разрешение в 4 мкс. Такое сверхвысокое временное разрешение вообще нереалистично для каких-либо нейрофизиологических процессов, поскольку элементарные нейрофизиологические события (синаптические потенциалы, потенциалы действия и др.) имеют длительность как минимум порядка единиц миллисекунд или долей миллисекунды.

Кроме того, если увеличить плотность гребней спектра, то обе задержки (как между сегментами, так и в пределах задержанного сегмента автокорреляционной функции) возрастут, что должно облегчить обнаружение сдвига спектра, в то время как, согласно экспериментальным данным, различение при больших значениях плотности, наоборот, ухудшается.

Исходя из выше сказанного, роль временного анализа при анализе шума с узкополосным гребенчатым спектром и частотно пропорциональным расположением гребней сомнительна. Хотя в некоторых работах делалось предположение о возможности различения слуховой системой задержек до десятков мкс (Krumbholz, Patterson, 2002), достаточно убедительных подтверждений такого предположения пока нет.

Исходя из этого, более вероятным механизмом при анализе сложных спектров нам представляется «частотный» анализ – анализ по принципу места. Дальнейшее обсуждение данных мы будем проводить, основываясь на нём.

Модель такого анализа подразумевает, что в ответ на звуковой сигнал в слуховой системе возникает некоторый профиль возбуждения: выходы слуховых фильтров, через которые проходит звуковой сигнал, как функция положения фильтра на частотной шкале слуховой улитки. Для получения профиля возбуждения необходимо «пропустить» спектр входного сигнала через гипотетический слуховой фильтр, чему соответствует операция математической свёртки двух функций: входного сигнала и импульсной характеристики фильтра. Изменения, возникающие в сигнале, будут

различимы только тогда, когда профиль возбуждения изменяется больше, чем на некоторую критическую величину.

Рассмотрим основные закономерности, полученные в наших экспериментах, с точки зрения «частотного» механизма анализа сложных спектров. В большинстве случаев «частотная» модель удовлетворительно объясняет экспериментальные данные.

6.2. Зависимость порога сдвига фазы от интенсивности сигнала

В наших экспериментах интенсивность звукового сигнала не оказывала значительного влияния на пороги различения сдвига фазы гребенчатого спектра. В этом отношении наши результаты согласуются с данными, полученными при исследовании частотной разрешающей способности слуха: в этих работах также было показано, что интенсивность тест-сигнала не оказывает существенного влияния на ЧРС.

Известно, как было отмечено в литературном обзоре, что при изменении интенсивности звука происходит расширение характеристик (снижение частотной селективности) слуховых частотно-избирательных фильтров. Можно было ожидать, что снижение селективности фильтров должно повлечь за собой снижение частотной избирательности слуха. Соответственно, можно было ожидать, что снижение частотной избирательности должно привести к увеличению порога различения частотного сдвига. Однако такого повышения не происходило.

Предлагаемое нами объяснение состоит в том, что при повышении интенсивности звукового сигнала меняется не ширина пиковой части частотной характеристики фильтра, отражающей работу активного механизма слуховой улитки, а соотношение пика фильтра и его широкой нижней части, отражающей работу пассивного механизма (Glasberg, Moore, 2000). До тех пор, пока вклад пиковой части существенно превышает вклад основания фильтра, форма пиковой части характеристики остаётся практически неизменной. Можно предположить, что при достаточно высоком отношении пик/основание фильтра, основная часть спектральной мощности входного сигнала передаётся только пиковой частью характеристики фильтра. Поэтому передача сигнала мало зависит от изменения относительных величин активного и пассивного механизма, пока активный механизм преобладает, а значит, мало зависит и от интенсивности сигнала. В наших экспериментах заметное повышение порога было выявлено только

при интенсивности 90 дБ и при плотности 1.4 и 2 цикл/окт, т.е. когда спектральные пики становятся шире. Этот результат согласуется с приведённой выше интерпретацией, поскольку при широких пиках спектра в передачи его мощности может участвовать и та часть фильтра, которая обусловлена работой пассивного механизма. Кроме того при высокой интенсивности вклад пассивного механизма увеличивается настолько, что это приведёт к расширению эффективной части характеристики фильтра и, следовательно, к снижению частотной избирательности.

6.3. Зависимость порога сдвига фазы от центральной частоты спектра сигнала

В достаточно широком диапазоне частот тест-сигнала (от 1 до 4 кГц) различие сдвига гребенчатого рисунка мало зависело от частоты. Однако при частоте 0.5 кГц порог различения значительно повышался, и различие было возможно только для плотности гребенчатого спектра 4 цикл/окт.

Такая закономерность имеет достаточно очевидное объяснение. Если бы различие плотности гребенчатого спектра не зависело от центральной частоты сигнала, то минимально различаемый интервал между гребнями стремился бы к нулю с уменьшением частоты. Но ширина слухового фильтра не может уменьшаться до нуля. Для относительно высоких частот ширина полосы пропускания слуховых частотно-селективных фильтров приблизительно пропорциональна центральной частоте фильтра, но такая зависимость не характерна для низких частот. В низкочастотной области добротность слуховых фильтров (параметр, описывающий остроту настройки слухового фильтра) уменьшается, т.к. она связана с шириной фильтра зависимостью

$$Q = f / \Delta f,$$

где f – центральная частота фильтра, а Δf – ширина характеристики фильтра. На низких частотах ширина характеристики фильтра не стремится к нулю, а приближается к постоянной величине (около 25 Гц), что приводит к снижению добротности. Снижение добротности слуховых фильтров на низких частотах должно ухудшать различие сложного рисунка спектра сигнала, что и наблюдалось в нашем исследовании.

6.4. Зависимость порога сдвига фазы от плотности и ширины гребней спектра

Из приведённых выше результатов следует, что при сохранении косинусоидальной формы гребней зависимость порога от плотности гребенчатого спектра приблизительно одинакова при всех центральных частотах спектра и интенсивностях сигнала. Однако при отступлении от косинусоидальной формы гребней спектра - уменьшении ширины, различие частотного сдвига улучшается.

Эта закономерность также может быть объяснена моделью внутренних профилей возбуждения в слуховой системе в ответ на звуковой стимул. Для описания слухового фильтра в данном случае использовался «простой» вариант *goex* функции, в которой не отражено изменение формы слухового фильтра в зависимости от интенсивности сигнала. Зависимостью от интенсивности сигнала можно пренебречь, поскольку, согласно как экспериментальным данным, так и модели, пороги различения сдвига спектральной структуры не зависели от интенсивности. В таком варианте функция слухового фильтра выглядит следующим образом:

$$W(g) = (1 + pg)exp^{-pg},$$

где g – нормализованное отклонение частоты входного сигнала от центральной частоты фильтра, p – параметр, который определяет ширину и наклон характеристики фильтра.

Мы предполагаем, что порог различения частотного сдвига (Thr) достигается, когда сдвиг профиля возбуждения достигнет некоторого критического значения (Cr) (Рисунок 29).

Когда плотность гребенчатого спектра невелика, профиль возбуждения воспроизводит структуру спектра без значительных изменений по сравнению с входным сигналом – не происходит значительного изменения глубины модуляции профиля возбуждения (рис 29, 1а). Однако, так как получаемый профиль возбуждения довольно пологий, то необходимое значения Cr будет достигаться только при значительном сдвиге спектра (1в). При повышении плотности гребенчатого спектра (2а) глубина модуляции профиля возбуждения будет незначительно уменьшаться (2в), но при этом крутизна гребней в профили возбуждения будут увеличиваться. При этом меньший частотный сдвиг удовлетворяет необходимому значению Cr . Дальнейшее увеличение плотности гребней спектра (3а) приведёт к дальнейшему уменьшению глубины модуляции спектра (3в).

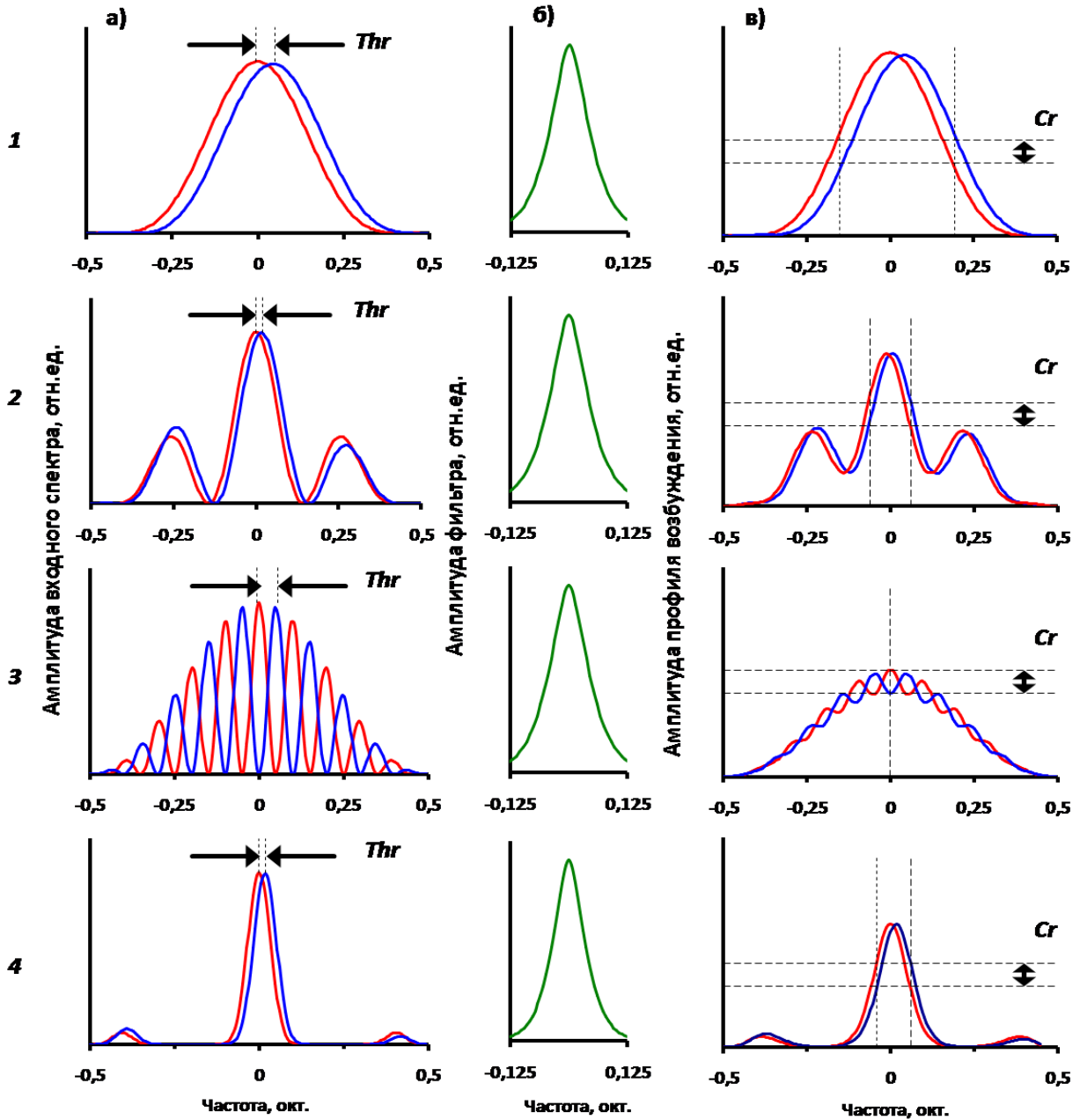


Рис. 29. Модель взаимодействия гребенчатых спектров с гипотетическим слуховым фильтром, *a* – фрагмент гребенчатой структуры спектра; *б* – форма слухового фильтра; *в* – профиль возбуждения, получаемый путём свёртки *a* и *б*. Красная и синяя линии - два спектра, сдвинутые один относительно другого по частотной шкале и соответствующие им профили возбуждения. 1 – косинусоидальная форма, плотность 1.25 цикл/окт; 2 – косинусоидальная форма, плотность 3.5 цикл/окт; 3 – косинусоидальная форма, плотность 10 цикл/окт; 4 – плотность 2.5 цикл/окт при узких гребнях спектра. *Thr* – величина сдвига, при котором наступает порог, *Cr* – критический уровень изменения в профиле возбуждения.

При этом большой сдвиг профиля возбуждения будет необходим, чтобы достичь значения Cr . Таким образом, самые низкие пороги наблюдаются при средних значениях плотности, когда глубина модуляции профиля возбуждения ещё достаточно велика и уже достаточно велика крутизна гребней.

Приведённую модель следует рассматривать как качественную, поскольку она не учитывает множество дополнительных параметров, которые могут оказывать большее или меньшее влияние на различение структуры спектра - таких, как точное значение ширины фильтров, точное значение критерия Cr и нелинейные эффекты слуховой системы. Но принципиальные особенности экспериментально найденных зависимостей порогов различения спектральных сдвигов от характера спектра сигнала удовлетворительно воспроизводятся моделью даже без учёта ряда дополнительных параметров. Например, если для описания формы слуховых фильтров вместо $goex$ функции использовать простую прямоугольную форму слухового фильтра с шириной 10% от центральной частоты, а значение критерия Cr принять равным 1 дБ, то получим функцию, которая также в первом приближении соответствует полученным экспериментальным данным.

Таким образом, модель, основанная на построении профилей возбуждения, достаточно хорошо описывает экспериментальные данные (Рисунок 30). На основании этой модели можно утверждать, что значительную роль в различении частотного сдвига сигнала с гребенчатым спектром играет механизм частотного анализа по принципу места.

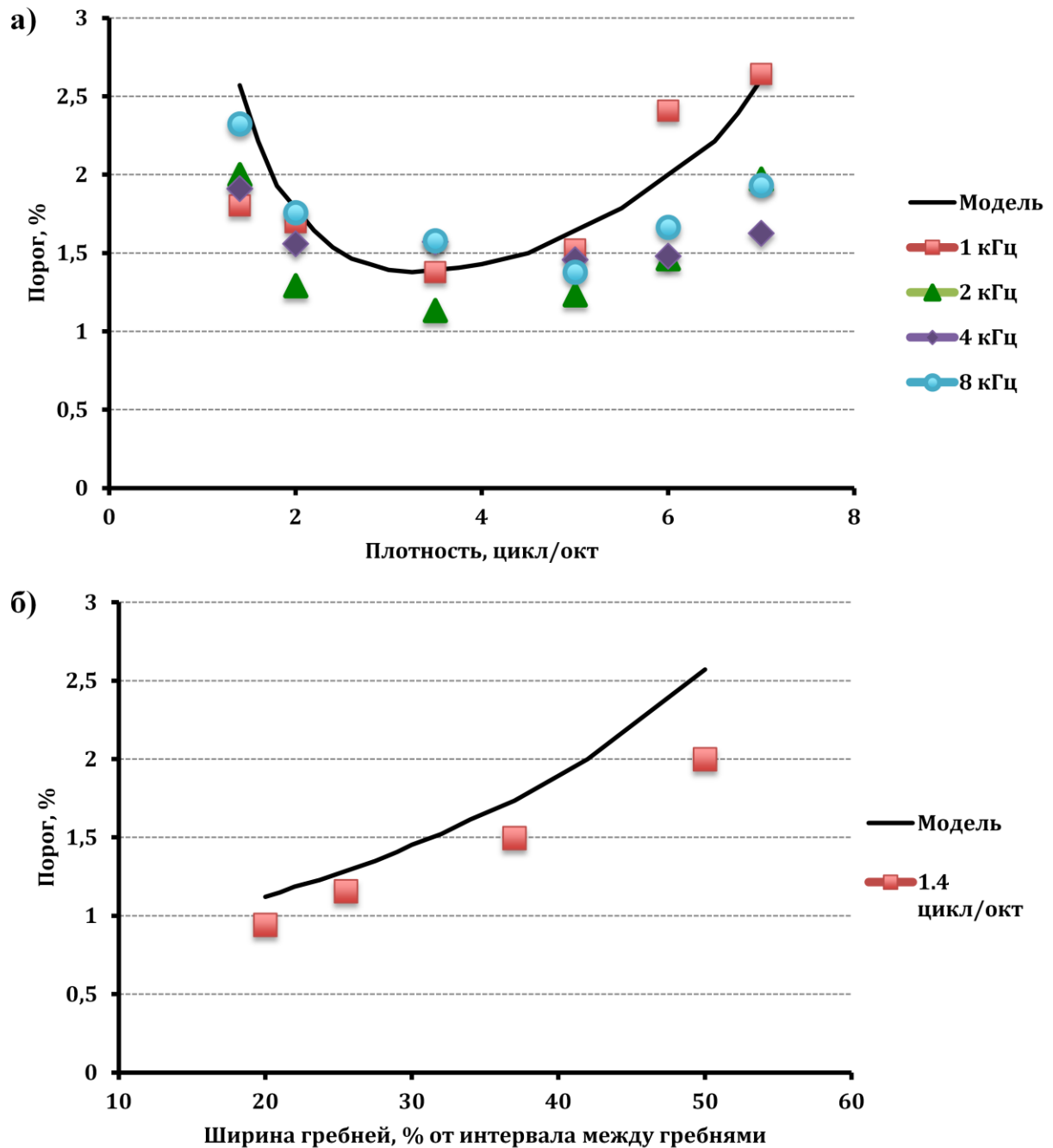


Рис. 30. Результаты моделирования: *а* – зависимости порога различения сдвига фазы гребней спектра от плотности (линия – предсказанный результат модели при ЭПШ фильтра 10% от центральной частоты и значения $Cr = 1$ дБ; точки – значения, полученные в эксперименте); *б* – зависимость порога от ширины гребней спектра для плотности 1.4 цикл/окт.

6.5. Влияние помех различной конфигурации на различение сдвига фазы гребенчатого спектра

Из приведённых выше результатов следует, что наибольший эффект маскировки наблюдается при совпадающих по частоте сигнале и маскере. Меньший эффект был обнаружен при использовании низкочастотного маскера, а высокочастотный маскер не оказывал значительного влияния на различение частотного сдвига спектра сигнала. Такая закономерность была характерна как для тест-сигнала 50 дБ УЗД, так и для сигнала 80 дБ УЗД.

Было показано, что при совпадающих по частоте маскере и сигнале эффект маскировки зависел преимущественно от отношения интенсивностей маскер/сигнал, а при низкочастотном положении маскера эффект маскировки определялся преимущественно абсолютным значением интенсивности маскера.

В литературе представлены данные, касающиеся влияния маскера на различение частотного сдвига простого тона при маскировке шумом со спектральным вырезом. Было показано, что более эффективен шум, расположенный на частотной шкале ниже сигнала. Следовательно, изменения в низкочастотной стороне профиля возбуждения дают более выраженный эффект, чем в высокочастотной (Emmerich et. al., 1983; 1986). Эффективность низкочастотного маскера также была показана при сравнении маскировки низкочастотным шумом и маскировки белым шумом, который сочетал в себе как низкочастотный, так и совпадающий компонент (Fantini, 1988). Эффект же от высокочастотного маскера незначителен (Nelson, Staton, 1982). Как показали наши данные, сходные закономерности наблюдаются и при маскировке сдвига гребенчатого спектра.

Сравнение с ранее опубликованными данными по влиянию маскировки на частотную разрешающую способность слуха (Supin et al., 2001; 2005), показывает, что низкочастотная маскировка влияет на пороги частотного сдвига спектра сигнала иным образом, чем на частотную разрешающую способность (ЧРС). ЧРС ухудшалась уже при отношении интенсивностей маскер/сигнал -20 дБ, и это ухудшение не зависело от абсолютного значения интенсивности маскера. В отличие от этого, ухудшение различения частотного сдвига наступало, независимо от соотношения интенсивности маскер/сигнал, начиная с УЗД маскера 80 дБ. При совпадающем маскере в обоих случаях (влияние на ЧРА и влияние на пороги сдвига гребней) ход кривых был

одинаковым, и эффект маскировки зависел от отношения интенсивностей маскер/сигнал (Рисунок 31).

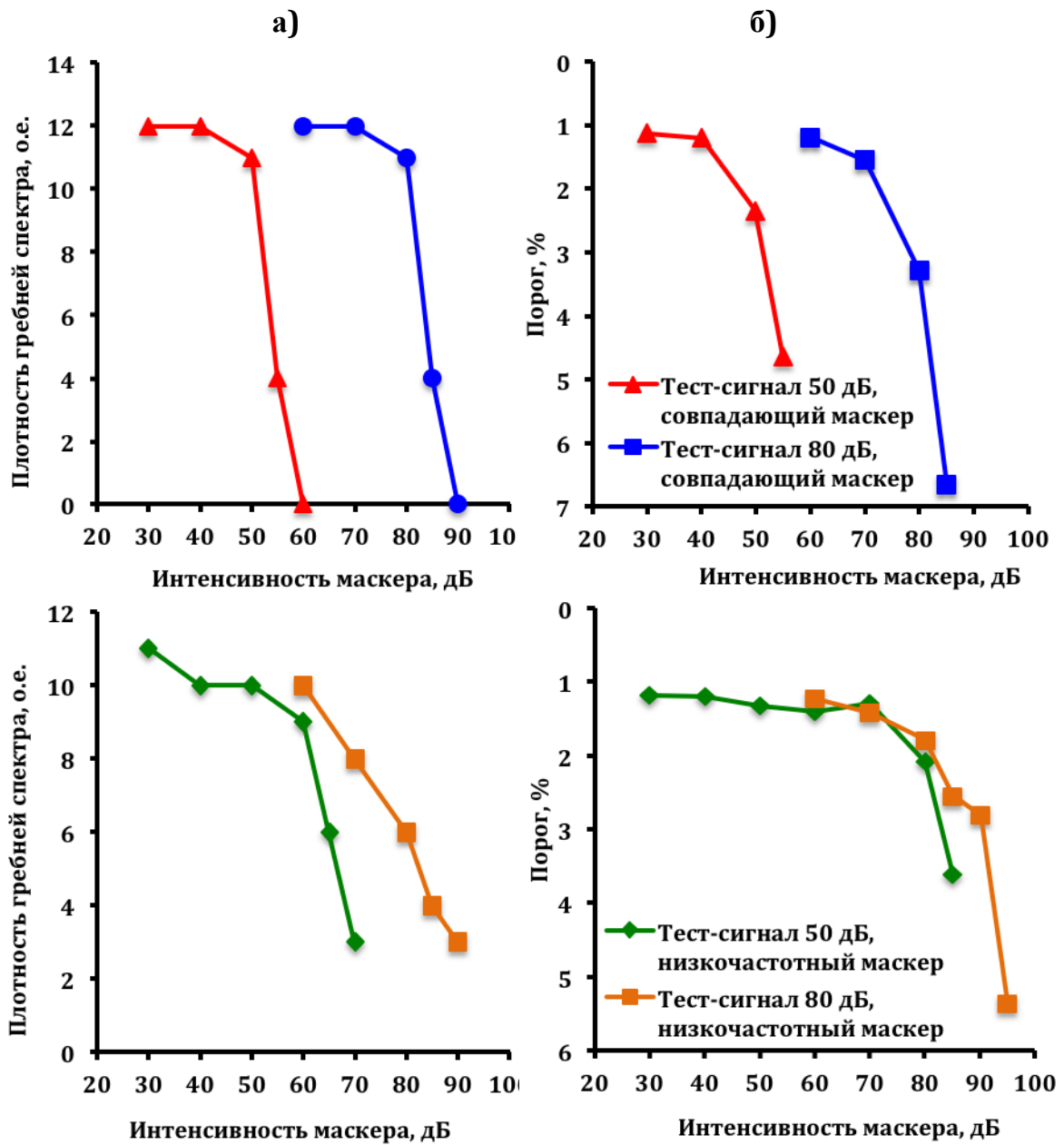


Рис. 31. Сравнение зависимости ЧРС (а) и порогов различения частотного сдвига гребней спектра (б) от интенсивности маскера для тест-сигналов 50 и 80 дБ.

Как и для ситуации без маскировки, рассмотренной выше, полученные результаты можно объяснить, используя модель профилей возбуждения. Профиль возбуждения рассчитывали путём математической свёртки спектра сигнала и маскира с передаточной функцией слухового частотно-селективного фильтра. Но в отличие от предыдущего раздела, при анализе эффектов маскировки использовали более полную функцию слухового фильтра, в которую включена зависимость ширины частотной полосы фильтра от интенсивности входного сигнала. Низкочастотная сторона фильтра, зависящая от интенсивности, описывается следующим уравнением:

$$W(g) = ((G_{lin} \cdot (1 + p_l g) \exp(-p_l g) + (1 + t g) \exp(-t g))) / ((G_{lin} + 1)),$$

где G - параметр, зависящий от интенсивности сигнала, p_l определяет наклон фильтра у вершины с низкочастотной стороны, t определяет наклон основания фильтра.

Высокочастотная сторона описывается простым уравнением, т.к. принимаем, что её форма не зависит от интенсивности.

$$W(g) = (1 + p_u g) \exp^{-p_u g},$$

где p_u определяет наклон фильтра с высокочастотной стороны.

Такая модель удовлетворительно объясняет эффекты маскировки, а также различие между влиянием низкочастотного маскира и маскира, совпадающего по частоте с тест-сигналом (Рисунок 32).

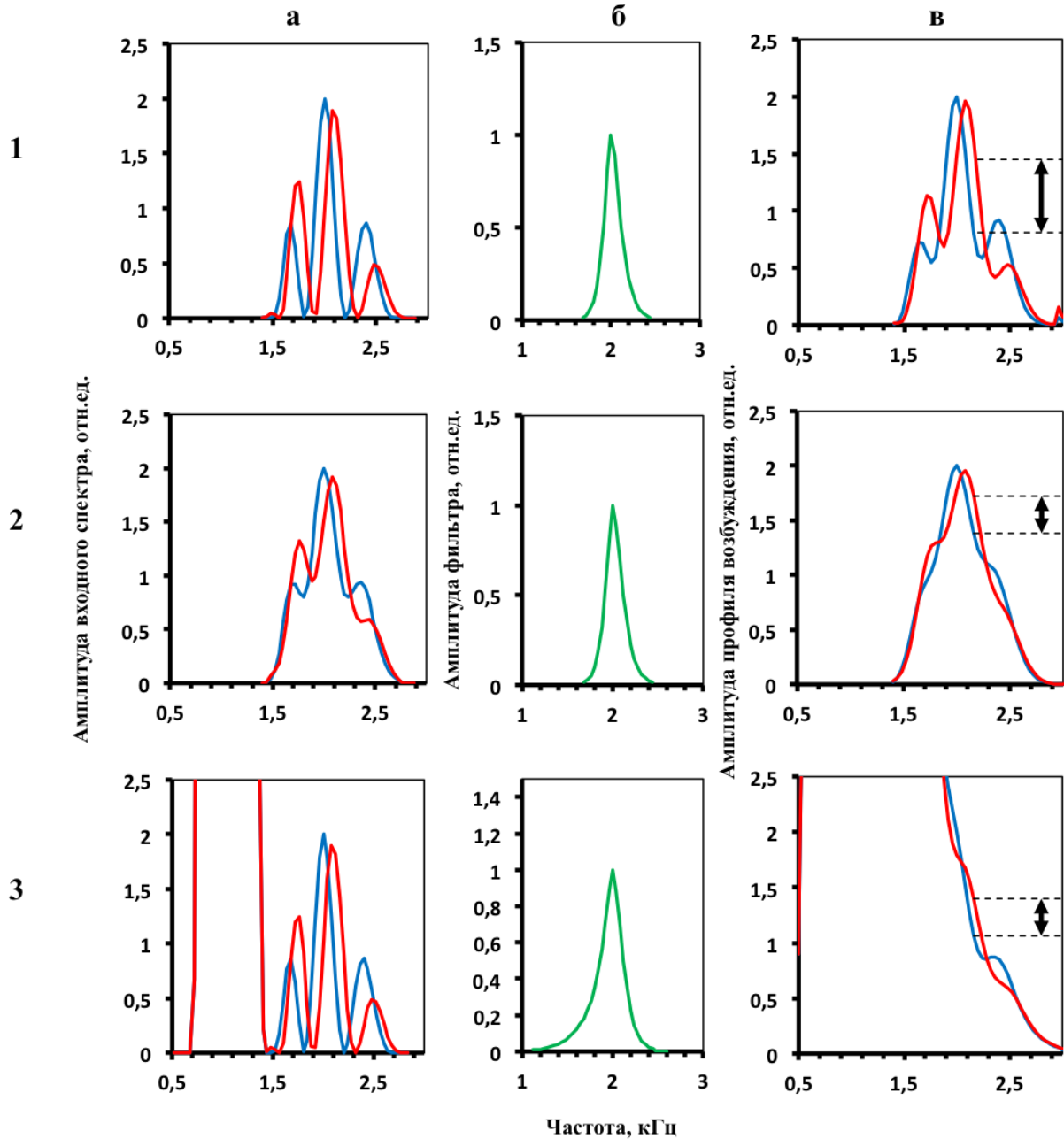


Рис. 32. Модель взаимодействия гребенчатых спектров и маскеров:

а – входной сигнал: сумма тест-сигнала и маска; *б* – форма слухового фильтра; *в* – профиль возбуждения, получаемый путём свёртки *а* и *б*. Красная и синяя линии на (*а*) – два спектра, сдвинутые один относительно другого по частотной шкале и соответствующие им профили возбуждения (*в*). 1 – гребенчатый спектр плотностью 3.5 цикл/окт без маскера; 2 – сигнал и совпадающий по частоте маскер; 3 – сигнал и низкочастотный маскер. Стрелками показана величина сдвига в профиле возбуждения.

Эффект маскировки, возникающий при совпадающих по частоте маскере и тест-сигнале, вероятнее всего обусловлен механизмом энергетической маскировки. Маскер, накладываясь на тест-сигнал, уменьшает глубину модуляции спектра и, следовательно, глубину модуляции профиля возбуждения, возникающего в слуховой системе (рисунок 32 1а). Чем выше интенсивность маскера, тем меньше глубина модуляции профиля возбуждения. Вследствие этого сдвиг профиля возбуждения, возникающий в результате сдвига спектра входного сигнала (2в), вызовет относительно меньший перепад в каждой точке профиля возбуждения по сравнению с таковым в отсутствие помехи (1в). Полное подавление способности различать частотный сдвиг спектрального рисунка наступит тогда, когда глубина модуляции профиля возбуждения становится меньше дифференциального порога по интенсивности.

Согласно приведённым выше данным, при совпадающих по частоте маскере и тест-сигнале полная маскировка наступает при превышении уровня маскера над уровнем тест-сигнала от 5 до 10 дБ, т.е. мощность маскирующего шума должна превосходить среднюю мощность тест-сигнала в 3-10 раз. Если принять, что в отсутствии шума максимальная мощность тест-сигнала в пике и провале составляет соответственно 1 и 0 (при этом средняя мощность сигнала 0.5), то полная маскировка наступает тогда, когда мощность шума имеет величину от 1.5 до 5, при этом мощность пика в суммарном сигнале маскер + тест-сигнал составит от 2.5 до 6, а в провале от 1.5 до 5. Таким образом, полная маскировка наступает, когда мощность спектра в пике будет в 1.2-1.6 раза больше, т.е. на 1-2 дБ выше, чем в провале. Это значение согласуется со значением дифференциального порога по интенсивности для гребенчатого спектра, которое было получено при исследовании ЧРС – 1.8 дБ. Такое же значение было получено при исследовании порога для глубины модуляции при различении гребенчатой структуры спектра (Supin et al., 1994). Следовательно, в случае совпадающих по частоте маскера и сигнала именно энергетическая маскировка играет главную роль.

Низкочастотная маскировка не может быть объяснена только исходя из концепции энергетической маскировки. Профиль возбуждения от низкочастотного маскера постепенно расширяется с увеличением интенсивности маскера, частично перекрывая профиль возбуждения от тест-сигнала, тем самым уменьшая его глубину модуляции, но этот эффект незначителен даже при большой интенсивности маскера

(рисунок 32 3в). Более вероятным механизмом, обеспечивающим низкочастотную маскировку, будет эффект латерального подавления (*lateral suppression*), который снижает эффективность активного механизма. С повышением интенсивности низкочастотного маскира происходит подавление работы активного механизма частотной избирательности улитки на соседних участках и ухудшение частотной настройки, что в свою очередь приводит к ухудшению различения частотного сдвига спектра тест-сигнала. Решающим фактом влияния на расширение фильтра является именно абсолютная интенсивность маскира (УЗД).

При высокочастотном маскире не выявлено значительного эффекта маскировки. Это также можно объяснить предложенной моделью, поскольку повышение интенсивности маскира приводит к расширению высокочастотной, но не низкочастотной стороны профиля возбуждения. Эффект латерального подавления также распространяется преимущественно в высокочастотную сторону. Поэтому латеральное подавление не влияет существенно на различении частотного сдвига спектра сигнала, расположенного на частотной шкале ниже маскира.

Рассчитаем, соответствуют ли полученные экспериментальные данные предсказаниям модели. Для этого будем использовать следующие параметры *гоел* функции слухового фильтра: $p(u) = 28.3$, $p(l)=39.2$, $t=13.8$ и параметр G будем варьировать в зависимости от интенсивности сигнала согласно Glasberg, Moore, 2000. Величину изменения профиля возбуждения, необходимую для определения частотного сдвига, а примем от 1 до 2 дБ; такое значение соответствует как полученным результатам (см. выше), так и результатам, полученным в экспериментах по определению порога различения глубины модуляции гребенчатого спектра (Supin et. al., 1994). Ряд исследований показывает, что это значение находится в районе от 2 до 3 дБ. (Moore, Sek, 1994). Модель была протестирована для всех этих значений – от 1 до 3 дБ. Наилучшее соответствие экспериментальным данным было получено при значении критерия различения 1 дБ (Рисунок 33).

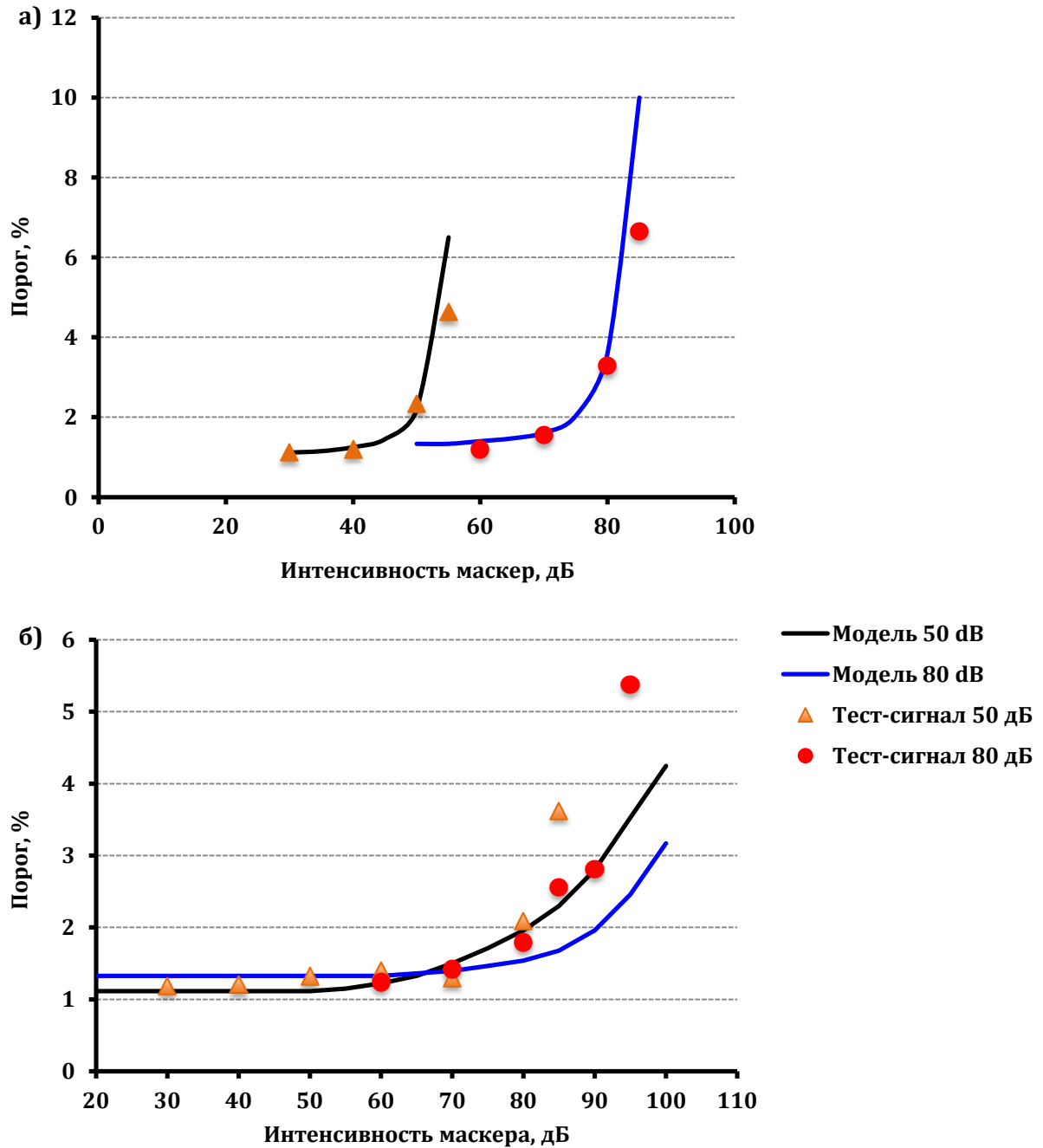


Рис. 33. Сравнение теоретических расчётов с экспериментальными данными по влиянию маскировки на различие сдвига гребенчатого спектра: *а)* masker и тест-сигнал совпадают по частоте, *б)* masker ниже по частоте чем тест-сигнал. Линия – предсказанный результат модели; точки – значения, полученные в эксперименте.

Сравнение показывает, что экспериментальные результаты могут быть, хотя и не полностью, объяснены предложенной моделью. Для маскера, совпадающего по частоте с тест-сигналом, модель даёт хорошее совпадение с экспериментальными данными. Однако некоторые расхождения предсказаний модели и экспериментальных данных имеют место при анализе эффектов низкочастотной маскировки. Тем не менее, модель в принципе подтверждает, что при низкочастотной маскировке основным фактором влияния является абсолютное значение интенсивности (УЗД) маскера. Расхождение обусловлено, скорее всего, тем, что модель не учитывает взаимодействие между слуховыми фильтрами. Модель предполагает, что фильтр как для маскера, так и для сигнала, одинаков. Предложить более сложную, количественную модель, учитывающую все аспекты, на данный момент, по полученным данным не представляется возможным.

6.6. Отличие частотных дифференциальных порогов для простых тонов от порогов различения частотного сдвига гребенчатого спектра

В данном исследовании было установлено, что минимальный различимый частотный сдвиг для гребенчатого спектра косинусоидальной формы составляет немного больше 1%; при сужении гребней спектра порог снижается до 0.7%. В то же время, для чистого тона частотные дифференциальные пороги составляют порядка 0.2% (Sek, Moore, 1995). Такое различие можно объяснить несколькими факторами.

Во-первых, различие порогов для чистых тонов и гребенчатых спектров может быть объяснено отсутствием условий для временного анализа в случае сигнала с гребенчатым спектром, о чем было сказано выше. При определении частотных дифференциальных порогов (DLF) для простого тона таких ограничений нет приблизительно до частоты тона 5 кГц. В случае теста с обнаружением частотной модуляции (FMDL), временной анализ работает при низкой частоте модуляции; с повышением частотной модуляции временной анализ становится менее эффективен и пороги возрастают до 1%.

Кроме того, в данной работе в качестве тест-сигнала используется шум, который имеет краткосрочные амплитудные и спектральные флуктуации. Наличие таких флуктуаций может усложнять различение незначительных изменений в сигнале. Такой эффект был показан ранее для частотных дифференциальных порогов (Moore, 1973).

7. Заключение

В работе были исследованы пороги различения частотных изменений (сдвиг сигнала по частоте) для сложного сигнала на примере шума с гребенчатой формой спектрального рисунка и влияние шумовых помех различной конфигурации. Выявлены следующие основные характеристики чувствительности к спектральным сдвигам.

1. В широком диапазоне частот (1-4 кГц) пороги различения частотного сдвига для сигнала со сложным спектром не зависели от интенсивности сигнала. Значительное отличие порогов было обнаружено только для низкой частоты – 0.5 кГц.

2. Пороги частотного различения зависят от конфигурации спектра: плотности и ширины гребней. Зависимость порога от плотности гребней спектра не монотонна. Имеется некоторая оптимальная плотность гребней, при которой пороги минимальны. При повышении и понижении плотности пороги возрастали. Уменьшение ширины гребней спектра приводило к снижению порогов. Даже при оптимальной плотности гребней спектра значения порогов превышали частотные дифференциальные пороги, полученные ранее с использованием простых тональных сигналов и частотно-модулированных сигналов (при низкой степени модуляции).

Для объяснения результатов рассматривались два основных механизма частотного анализа, работающих в слуховой системе: частотный анализ по принципу места и временной механизм. Временной механизм не участвует или минимально участвует в анализе частотного сдвига узкополосного шумового сигнала с гребенчатым спектром при частотно пропорциональном расположении гребней спектра. Участие временного механизма маловероятно вследствие того, что при сдвиге спектрального рисунка задержки в автокоррелограмме сигнала составляли микросекунды, причём зависимость порогов от плотности гребней спектра имела немонотонный характер. Эти характеристики противоречат возможностям и предсказаниям временной модели анализа. Неэффективностью временного механизма может быть объяснено расхождение значений порогов для сигнала с гребенчатым спектром и простых тонов.

Исходя из этого, было сделано предположение, что основную роль в различении сдвигов сложных спектральных рисунков играет частотный анализ по принципу места. Чтобы проверить это предположение, была предложена модель, основанная на построении профиля возбуждения в слуховой системе путём свёртки спектра сигнала с формой слухового фильтра. Расчёты, полученные исходя из модели, достаточно хорошо

объясняют экспериментальные данные по зависимости порогов различения от плотности и ширины гребней спектра. Результаты, полученные для зависимости порогов от интенсивности сигнала и центральной частоты спектра сигнала, также хорошо согласуются с данной концепцией. Зависимость порогов различения от интенсивности сигнала может быть объяснена вкладом активного и пассивного механизмов частотной настройки в форму слухового фильтра, а зависимость от частоты - изменением ширины слуховых фильтров. Таким образом, основную роль в анализе частотного сдвига узкополосного шума с гребенчатым частотно-пропорциональным спектром играет частотный анализ по принципу места.

Далее были получены данные о влиянии маскирующего шумового сигнала на различения частотного сдвига гребенчатого спектра.

1. Наибольший эффект оказывал маскер, совпадающий по частотной полосе с сигналом. При этом маскировка зависела от отношения интенсивностей тест-сигнала и маскира.

2. При низкочастотном положении помехи зависимость маскировки от интенсивности маскира была более плавной, и эффект преимущественно зависел не от отношения маскер/сигнал, а от абсолютного значения интенсивности маскира.

3. Высокочастотный маскер не оказывал существенного влияния на различение частотного сдвига спектра сигнала.

Для объяснения этих результатов также была предложена модель, основанная на построении профилей возбуждения в слуховой системе. Модель согласуется с экспериментальными данными и подтверждает, что при совпадающем по частоте маскере основное значение имеет отношение интенсивностей маскира и тест-сигнала. При этом наблюдается классическая энергетическая маскировка. Для низкочастотного маскира модель предсказывает участие двух механизмов: энергетической маскировки и латерального подавления. Модель подтверждает преимущественное значение абсолютной интенсивности маскирующего сигнала.

8. Выводы

1. Определены пороги различения частотного сдвига спектра сложного сигнала при отсутствии шумовой помехи и на фоне шумовой помехи.
2. Пороги различения частотного сдвига сигнала с гребенчатым спектром превышали величины порогов, полученных ранее в экспериментах с использованием тональных и частотно-модулированных сигналов.
3. Пороги различения частотного сдвига сигнала с гребенчатым спектром не зависели от интенсивности сигнала.
4. Зависимость порогов от центральной частоты спектра не монотонна, на высоких частотах наблюдалось повышение порогов, понижение частоты приводит к резкому увеличению порога.
5. Зависимость порогов от плотности гребней спектра сигнала не монотонна. При уменьшении и увеличении плотности относительно некоторого оптимального значения приводит к повышению порогов различения частотного сдвига сигнала.
6. Обострение спектрального рисунка (сужение гребней спектра) приводит к улучшению различения частотного сдвига спектра сигнала.
7. Анализ частотного сдвига узкополосного шумового сигнала с частотно пропорциональным гребенчатым спектром осуществляется преимущественно по принципу места.
8. Эффективность маскировки шумом, совпадающим по частоте с тест-сигналом, зависит преимущественно от отношения интенсивностей маскира и тест-сигнала. Влияние шума происходит по принципу энергетической маскировки.
9. Эффективность маскировки низкочастотным шумом зависела от абсолютного значения интенсивности маскира. В маскировке участвуют два механизма: энергетическая маскировка и латеральное подавление.
10. Высокочастотный маскирующий шум не оказывал существенного влияния на различение частотного сдвига гребенчатого спектра сигнала.

Список литературы

1. Альтман А.Я., Таварткиладзе Г.А. Руководство по аудиологии. ДМК Пресс. 2003.
2. Попов В.В., Супин А.Я. Количественное измерение частотной разрешающей способности слуха человека // Докл. Акад. Наук. 1984. Т. 278. С. 1012–1016.
3. Супин А.Я. Острота (частотная разрешающая способность слуха) человека // Сенсорные системы. 2003. Т. 17. №4. С. 288 – 306.
4. Супин А.Я. Различение спектральной структуры звуковых сигналов на фоне помех // Российский физиологический журнал им. Сеченова. 2007. Т. 93. № 6. С. 576 – 591.
5. Супин А.Я., Попов В.В. Частотная разрешающая способность слуха: некоторые фундаментальные представления как основа практических решений // Физиология человека. 1987. Т. 13. С. 28 – 34.
6. Супин А.Я., Попов В.В., Милехина О.Н., Тараканов М.Б. Чувствительность слуха к контрасту спектрального рисунка звука // Докл. Акад. Наук. 1999. Т. 365. С. 571–573.
7. Супин А.Я., Попов В.В., Милехина О.Н., Тараканов М.Б. Влияние интенсивности звука на частотную разрешающую способность слуха и эффект помех // Доклады РАН. 2002. Т. 383. № 2. С. 134–137.
8. Супин А.Я., Попов В.В., Милёхина О.Н., Тараканов М.Б. Частотная разрешающая способность слуха человека: зависимость от интенсивности сигнала и помех // Сенсорные системы. 2002. Т. 16. № 4. С. 309 – 329.
9. Темчин А. Н., Реснио-Спинозо А., Кай Х., Ружжеро М.А. Бегущие волны в органе корти улитки шиншиллы // Сенсорные системы. 2012. Т. 26. № 4. С. 304–325.
10. Anderson E.S., Nelson D.A., Kreft H., Nelson P.B., Oxenham A.J. Comparing spatial tuning curves, spectral ripple resolution, and speech perception in cochlear implant users // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 130. P. 364 – 375.
11. Aronoff J.M., Landsberger D.M. The development of a modified spectral ripple test // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V.134. P. 217 – 222.
12. Bekesy G. Experiments In Hearing. New York: Mcgraw-Hill, 1960.
13. Berenstein C.K., Mens L.H., Mulder J.J.S., Vanpoucke F.J. Current steering and current focusing in cochlear implants: Comparison of monopolar, tripolar, and virtual channel electrode configuration // Ear. Hear. 2008. V. 29. P. 250 – 260.

14. *Bergman M., Najenson T., Korn C., Harel N., Erenthal P., Sacharov E.* Frequency selectivity as a potential measure of noise damage susceptibility // *British Journal of Audiology*. 1991. V. 26. P. 15 – 22.
15. *Cai Y., Geisler D.* Suppression in auditory-nerve fibers of cats using low-side suppressors. III. Model results // *Hearing Research*. 1996. V. 96. P. 126 – 140.
16. *Chermak G.D., Dengerink J.E.* Recovery of psychophysical tuning curves following noise exposure // *Scand. Audiol.* 1987. V. 16. P. 57 – 61.
17. *Cooper N.P., Rhode W. S.* Nonlinear mechanics at the apex of the guinea pig cochlea // *Hearing Research*. 1995. V. 82. P. 225 – 243.
18. *Dai H., Nguyen Q.T., Green D.M.* A two-filter model for frequency discrimination // *Hearing Research*. 1995. V. 85. P. 109 – 114.
19. *Dallos P., Zheng J., Cheatham M.A.* Prestin and cochlear amplifier // *Journal of Physiology*. 2006. V. 576. P. 37 – 42.
20. *Dau T., Kollmeier B., Kohlrausch A.* Modeling auditory processing of amplitude modulation. I. Detection and masking with narrowband carriers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 102. P. 2892 – 2905.
21. *Dau T., Puschel D., Kohlrausch A.* A quantitative model of the effective signal processing in the auditory system // *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. P. 3615 – 3631.
22. *Delgutte B.* Physiological mechanisms of psychophysical masking: Observations from auditory-nerve fibers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 87. P. 791 – 809.
23. *Dolan T.G., Mills J.H.* Recoveries of whole-nerve AP thresholds, amplitudes and tuning curves in gerbils following noise exposure // *Hearing Research*. 1989. V. 37. P. 193 – 202.
24. *Drennan W.R., Won J.H., Nie K., Jameyson E., Rubinstein J.T.* Sensitivity of psychophysical measures to signal processor modification in cochlear implant users // *Hearing Research*. 2010. V. 262. P. 1 – 8.
25. *Duifhuis H.* Consequences of peripheral frequency selectivity for nonsimultaneous masking // *J. Acoust. Soc. Am.* 1973. V. 54. P. 1471 – 1488.
26. *Dye R.H., Hafner E.R.* Just-noticeable differences of frequency for masking tones // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. V. 67. P. 1746 – 1753.
27. *Emmerich D.S., Brown W.S., Fantini D.A., Navarro N.C.* Frequency discrimination and signal detection in band reject noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1983. V. 74. P. 1702 – 1708.

28. *Emmerich D.S., Ellermeier W, Butensky B.* A re-examination of the frequency discrimination of random-amplitude tones, and a test of Henning's modified energy-detector model // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 85. P. 1653 – 1659.
29. *Emmerich D.S., Fantitni D.A., Brown W.S.* Frequency discrimination of tones presented in filtered noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. V. 80. P. 1668 – 1672.
30. *Evans E.F.* Auditory processing of complex sounds: an overview // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1992. V. B 336. P. 295 – 306.
31. *Fastl H., Zwicker E.* Psychoacoustics Facts and Models. New York: Springer, 2007.
32. *Fantini D.A.* Frequency discrimination near the spectral edge of simultaneous and forward masker // *J. Acoust. Soc. Am.* 1988. V. 85. P. 1691 – 1698.
33. *Fantini D.A., Emmerich D.S.* Edge effects on frequency discrimination of tones presented in low and high-pass noise background // *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. V. 82. P. 1593 – 1597.
34. *Feth L.L., Oesterle E.C., Kidd Jr. G.* Frequency selectivity after noise exposure // *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 65. P. 118.
35. *Flanagan J.L.* A difference limen for vowel formant frequency // *J. Acoust. Soc. Am.* 1955. V. 95. P. 1074 – 1084.
36. *Fletcher H.* Auditory patterns // *Reviews of Modern Physics*, 1940. V. 12. P. 47 – 65.
37. *Geisler C.D., Nuttall A.L.* Two-tone suppression of basilar membrane vibrations in the base of guinea pig cochlea using low-side suppressors // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 102. P. 430 – 440.
38. *Gockel H., Moore B.C.J., Plack C.J.* Effect of noise on the detectability and fundamental frequency discrimination of complex tones // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 120. P. 957 – 965.
39. *Glasberg B.R., Moore B.C.J.* Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data // *Hearing Research*. 1990. V. 47. P. 103 – 138.
40. *Glasberg B.R., Moore B.C.J.* Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformly exciting notched noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 108. P. 2318 – 2328.
41. *Green D.* Profile Analysis: A different view of auditory intensity discrimination // *Am. Psychol.* 1983. V. 38. P. 133 – 142.

42. *Green D.M.* On number of components in profile-analysis tasks // *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91. P. 1616 – 1623.
43. *Green D.M., Onsan Z.A., Forrest T.G.* Frequency effects in profile analysis // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1987. V. 81. P. 692 – 699.
44. *Hawks J.W.* Difference limens for formant patterns of vowel sounds // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. V. 95. P. 1074 – 1084.
45. *Henning G.B.* Frequency discrimination of random amplitude tones // *J. Acoust. Soc. Am.* 1966. V. 39. P. 336 – 339.
46. *Henry B.A., Turner C.W.* The resolution of complex spectral patterns by cochlear implant and normal – hearing listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 113. P. 2861 – 2873.
47. *Henry B.A., Turner C.W.* Spectral peak resolution and speech recognition in quiet: Normal hearing, hearing impaired, and cochlear implant listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 118. P. 1111 – 1121.
48. *Hoekstra A.* Frequency discrimination in noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1967. V. 67. P. 774 – 777.
49. *Houtgast T.* Auditory-filter characteristics derived from direct-masking and pulsation-threshold data with a rippled-noise masker // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62. P. 409–415.
50. *Irino T., Patterson R.D.* A time-domain, level-dependent auditory filter: the gammachirp // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 101. P. 412 – 419.
51. *Kewlet-Port D.Li.X., Watson C.S.* Formant-frequency discrimination for isolated English vowels // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. V. 95. P. 485 – 496.
52. *Kewley-Port D.Li.X., Zeng Y., Neel A.* Fundamental frequency effects on thresholds for vowel formant discrimination // *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 100. P. 2462 – 2470.
53. *Kiang N.Y.S., Watanabe T., Thomas E.C., Clark L.F.* Discharge Patterns of Single Fibers in the Cats Auditory Nerve. Cambridge. MA: MIT Press, 1965.
54. *Krumbholtz K., Patterson R.D., Nobble A.* Asymmetry of masking between noise and iterated rippled noise: Evidence for time-interval processing in the auditory system // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 2096 – 2107.
55. *Krumbholz K., Patterson R.D.* Microsecond temporal resolution in monaural hearing without spectral cues? // *J. Acoust. Soc. Am.* 2002. V. 113. P. 2790 – 2800.

56. *Kohlrausch A., Houstman A.J.M.* Pitch related to spectral edges of broadband signal // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1992. V. B336. P. 375 – 382.
57. *Kujawa S.G., Liberman M.C.* Adding insult to injury: cochlear nerve degeneration after “temporary” noise-induced hearing loss // *J. Neurosci.* 2009. V. 29. P. 14077 – 14085.
58. *Kujala T., Brattico E.* Detrimental noise effects on brain’s speech functions // *Biological Psychology.* 2009. V. 81. P. 135 – 143.
59. *Lopez-Poveda E.A., Meddis R.* A human nonlinear cochlear filterbank // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 3107 – 3118.
60. *Liberman M.C., Beil D.G.* Hair Cell Condition and auditory nerve response in normal and noise-damage cochleas // *Acta Oto-Laryngologica.* 1979. V. 88. P. 161 – 179.
61. *Liu C., Kewley-Port D.* Formant discrimination in noise for isolated vowels // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 116. P. 3119 – 3129.
62. *Martin P., Mehta A.D., Hudspeth A.J.* Negative hair-bundle stiffness betrays a mechanism for mechanical amplification by the hair cell // *Proceedings of the National Academy of Science USA,* 2000. V. 97. P. 12026 – 12031.
63. *McFadden D.* The curious half octave shift: evidence for a basal ward migration of the travelling-wave envelope with increasing intensity // *Basic and applied aspects of noise-induced hearing loss / Eds. R.J. Salvi, D. Henderson, R.P. Hamernik, V. Colletti.* New-York: Plenum. 1986.
64. *McKay C., Azadpour M., Akhoun I.* In search of frequency resolution // *Conference on Implantable Auditory Prostheses.* July 2009. Lake Tahoe, CA.
65. *Melnick W.* Human temporary threshold shift (TTS) and damage risk // *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. V. 90. P. 147 – 154.
66. *Meddis R., O`Mard L.P.* A computer model of the auditory-nerve response to forward-masking stimuli // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 117. P. 3787 – 3798.
67. *Mermelstein P.* Difference limens for formant frequencies of steady-state and consonant-bound vowels // *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 63. P. 572 – 580.
68. *Micheyl C., Xiao L., Oxenham A.J.* Characterizing the dependence of pure-tone frequency difference limens on frequency, duration, and level // *Hearing Research.* 2012. V. 292. P. 1-13.
69. *Mills J.H., Adkins W.Y., Gilbert R.M.* Temporary threshold shifts produced by exposure to low-frequency noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1983. V. 73. P. 918 – 923.

70. *Mills J.H., Gilbert R.M., Adkins W.Y.* Temporary threshold shifts in humans exposed to octave bands of noise for 16 to 24 hours // *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 65. P. 1238 – 1248.
71. *Moore B.C.J.* Frequency difference limens for short-duration tones // *J. Acoust. Soc. Am.* 1973. V. 54. P. 610 – 619.
72. *Moore B.C.J.* Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking // *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 63. P. 524 – 532.
73. *Moore B.C.J.* An introduction to the psychology of hearing. Leiden, Boston. Brill, 2013.
74. *Moore B.C.J., Alcantara J.I., Dau T.* Masking patterns for sinusoidal and narrowband noise maskers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 104. P. 1023 – 1038.
75. *Moore B.C.J., Alcantara J.I., Glasberg B.R.* Behavioral measurement of level-dependent shifts in the vibration pattern on the basilar membrane // *Hearing Research.* 2002. V. 163, P. 101 – 110.
76. *Moore B.C.J., Ernst S.M.A.* Frequency difference limens at high frequencies: Evidence for a transition from a temporal to a place code // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 132. P. 1542 – 1547.
77. *Moore B.C.J., Sek A.* Effects of carrier frequency and background noise on the detection of mixed modulation // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. V. 96. P. 741 – 751.
78. *Moore B.C.J., Glasberg B.R.* Suggested formulae for calculating auditory filter bandwidths and excitation patterns // *J. Acoust. Soc. Am.* 1983. V. 74. P. 750 – 753.
79. *Moore B.C.J., Glasberg B.R.* The danger of using narrowband noise maskers to measure suppression // *J. Acoust. Soc. Am.* 1985. V. 77. P. 2137 – 2141.
80. *Moore B.C.J., Glasberg B.R.* Mechanisms underlying the frequency discrimination of pulsed tones and detection of frequency modulation // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 86. P. 1722 – 1732.
81. *Moore B.C.J., Glasberg B.R.* Effects of signal-to-noise ratio on the frequency discrimination of complex tones with overlapping or nonoverlapping harmonics // *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. V. 89. P. 2858 – 2865.
82. *Moore B.C.J., Glasberg B.R., Shailer M.J.* Frequency and intensity difference limens for harmonics within complex tones // *J. Acoust. Soc. Am.* 1984. V. 75. P. 550 – 561.
83. *Moore B.C.J., Vickers D.A.* The role of spread of excitation and suppression in simultaneous masking // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 83. P. 2284 – 2290.

84. *Neff D.L.* Stimulus parameters governing confusion effects in forward masking // *J. Acoust. Soc. Am.* 1985. V.78. P. 1966 – 1976.
85. *Nelson D.A., Stanton M.E.* Frequency discrimination at 1200 Hz in the presence of high-frequency masking noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 71. P. 660 – 664.
86. *Nelson D.A., Stanton M.E., Freyman R.L.* A general equation describing frequency discrimination as a function of frequency and sensation level // *J. Acoust. Soc. Am.* 1983.V.73. P. 2117 – 2123.
87. *Oxenham A.J., Plack C.J.* Suppression and the upward spread of masking // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 101.P. 1921 – 1934.
88. *Oxenham A.J., Shera C.A.* Estimates of human cochlear tuning at low levels using forward and simultaneous masking // *Journal of the Association for Research in Otolaryngology.* 2003. V. 4. P. 541 – 554.
89. *Oxenham A.J., Wojtczak M.* Frequency selectivity and masking // *The Oxford Handbook of auditory science: Hearing / Eds. C.J. Plack.* Oxford University Press. 2010. P. 5 – 45.
90. *Patterson R.D.* Auditory filter shapes derived with noise stimuli // *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 59. P. 640 – 654.
91. *Patterson R.D., Allerhand M.H., Giguere C.* Time-domain modeling of peripheral auditory processing: A modular architecture and a software platform // *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 98. P. 1890 – 1894.
92. *Patterson R.D., Moore B.C.* Auditory filters and excitation patterns as representations of frequency resolution // *Frequency selectivity in hearing / Ed. Moore B.C.J.* London: Acad. Press. 1986. P. 123–177.
93. *Patterson R.D., Nimmo-Smith I.* Off-frequency listening and auditory filter asymmetry // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. V. 67. P. 229 – 245.
94. *Patterson R.D., Nimmo-Smith I., Weber D.L., Milroy R.* The deterioration of hearing with age: Frequency selectivity, the critical ratio, the audiogram, and speech threshold // *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 72. P. 1788–1803.
95. *Pick G.* Level dependence of psychophysical frequency resolution and auditory filter shape // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. V. 68. P. 1085–1095.
96. *Recanzone G.H.* Response profiles of auditory cortical neurons to tones and noise in behaving macaque monkeys // *Hearing Research.* 2000. V. 150. P. 104 – 118.

97. *Rhode W.S.* Observations on the vibration of the basilar membrane in squirrel monkeys using the Mossbauer technique // *J. Acoust. Soc. Am.* 1971. V. 49. P.1218 – 1231.
98. *Rhode W.S., Greenberg S.* Lateral suppression and inhibition in the cochlear nucleus of the cat // *J. Neurophysiol.* 1994. V. 71. P. 493–514.
99. *Rhode WS, Recio A.* Study of mechanical motions in the basal region of the chinchilla cochlea // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V.107: P.3317 – 3332.
100. *Robles L., Ruggero M.A.* Mechanics of the mammalian cochlea // *Physiol. Rev.* 2001. V. 81. P. 1305 – 1352.
101. *Rose J. E., Brugge J. F., Anderson D. J., Hind J. E.* Patterns of activity in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey // *Hearing Mechanisms in Vertebrates* / Eds. A.V. Sd, Reuck, J. Knight. London: Churchill, 1968.
102. *Ruggero M. A., Rich N. C., Recio A., Narayan S. S., Robles L.* Basilar-membrane responses to tones at the base of the chinchilla cochlea // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 101. P. 2151 – 2163.
103. *Ruggero M. A., Robles L, Rich N. C.* Two-tone suppression in the basilar membrane of the cochlea: mechanical basis of auditory-nerve rate suppression // *J. Neurophysiol.* 1992. V.68. P.1087 – 1099.
104. *Sachs M. B., Kiang N. Y. S.* Two-tone inhibition in auditory nerve fibers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1968. V.43. P. 1120 – 1128.
105. *Salt A.N.* Acute endolymphatic hydrops generated by exposure of the ear to nontraumatic low-frequency tones // *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2004. V. 5. P. 203 – 214.
106. *Salvi R.J., Hamernik R.P., Henderson D.* Discharge patterns in the cochlear nucleus of the chinchilla following noise induced asymptotic threshold shift // *Exp. Brain. Res.* 1978. V. 32. P. 301 – 320.
107. *Scharf B.* Critical bands // *Foundations of Modern Auditory Theory* /Ed. J.V. Tobias. New York: Academic Press, 1970.
108. *Sek A., Moore B.C.* Frequency discrimination as a function of frequency, measured in several ways // *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 87. P. 2479 – 2486.
109. *Shamman S.A., Kowalski N., Versnel H.* Ripple analysis in the ferret primary auditory cortex. Topographic distribution of ripple response parameters // *J. Auditory Neurosci.* 1995. V. 1. p. 271 – 278.

110. *Small A.M., Daniloff R.G.* Pitch of noise bands // *J. Acoust. Soc. Am.* 1967. V. 92. P. 773 – 781.
111. *Smith R.L.* Adaptation, saturation, and physiological masking in single auditory-nerve fibers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 65. P. 166 – 178.
112. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Frequency resolving power measured by rippled noise // *Hearing Research.* 1994. V. 78. P. 31–40.
113. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Frequency-temporal resolution of hearing measured by rippled noise // *Hearing Research.* 1997. V. 108. P. 17–27.
114. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Ripple density resolution for various rippled-noise patterns // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. P. 2042–2050.
115. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* The effect of masking noise on rippled-spectrum resolution // *Hearing Research.* 2001. V. 151. P. 157 – 166.
116. *Supin A.Ya., Popov V.V., Milekhina O.N., Tarakanov M.B.* Ripple-spectrum resolution dependence on masker-to-probe ratio // *Hearing Research.* 2005. V. 2004. P. 191 – 199.
117. *Turner C.W., Relkin E.M., Douset J.* Psychophysical and physiological forward masking studies: probe duration and rise-time effects // *J. Acoust. Soc. Am.* V. 95. P. 795 – 800.
118. *Unoki M., Irino T., Glasberg B. R., Moore B. C. J., Patterson, R. D.* Comparison of the roex and gamrnachirp filters as representations of the auditory filter // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006.V. 120. P.1474 – 1492.
119. *Vogten L.L.M.* Pure-tone masking: A new result from a new method // *Facts and models in hearing / Eds Zwicker E., Terhardt E.* Berlin: Springer-Verlag, 1974. P. 142–155.
120. *Werner L.A.* Frequency discrimination in noise by untrained listeners // *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 97. P. 3273.
121. *Wier C.C., Jesteadt W., Green D.M.* Frequency discrimination as a function of frequency and sensation level // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 61. P. 178–184.
122. *Won J.H., Drennan, W.R., Rubinatein J.T.* Spectral-ripple resolution correlates with speech reception in noise in cochlear implant users // *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2007. V. 8. P. 384 – 392.

123. *Won J.H., Humphrey E.L., Yeager K.R., Martinez A.A., Robinson C.H., Mills K.E., Johnstone P.M.* Relationship among the physiologic channel interactions, spectral-ripple discrimination, and vowel identification in cochlear implant users // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. V. 136. P. 2714 – 2725.
124. *Yasin I., Plack C.J.* The effects of high-frequency suppressor on tuning curves and derived basilar-membrane response functions // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 114. P. 322–332.
125. *Yost W.A.* The dominance region and ripple-noise pitch: A test of the peripheral weighting model // *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 72. P. 416–425.
126. *Yost W.A.* Pitch of iterated rippled noise // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1996. V. 100. P. 511 – 518.
127. *Zhang X. , Heinz M. G., Bruce I. C., Carneyl. H.* A phenomenological model for the responses of auditory-nerve fibers: I. Nonlinear tuning with compression and suppression. // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001.V. 109. P. 648 – 670.
128. *Zinn C.,Maier H., Zenner H. H, Gummer A. W.* Evidence For Active, Nonlinear, Negative Feedback In The Vibration Response Of The Apical Region Of The In Vivo Guinea-Pig Cochlea // *Hear. Res.* 2000. V.142. P.159–183.
129. *Zwicker E.* Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenz gruppen) // *J. Acoust. Soc. Am.* 1961.V. 33. P. 248.
130. *Zwicker E.* Masking and psychological excitation as consequences of the ear`s frequency analysis // *Frequency Analysis and periodicity detection in hearing.* / Eds. Plomp R., Smoorenburg G.F., Sijthoff, leiden. 1970. P. 376 – 396.