

*На правах рукописи*



**Нечаев Дмитрий Игоревич**

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

Специальность 03.03.06 - нейробиология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в лаборатории сенсорных систем позвоночных Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова» РАН.

Научный руководитель:

**Супин Александр Яковлевич**

проф., д.б.н., гл.н.с.

ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова

Официальные оппоненты:

**Андреева Ирина Германовна**

д.б.н., в.н.с.

ФГБУН Институт Эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова

**Римская-Корсакова Людмила Красармовна**

к.б.н., в.н.с.

.Акционерное общество Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева

Ведущая организация: ФГБУН Российский научно-практический центр аудиологии и слухопротезирования

Защита диссертации состоится **18 апреля 2016 года в 15:30** на заседании диссертационного совета Д 501.001.93 при биологическом факультете Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московского государственного университета М.В. Ломоносова» по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, строение 12, аудитория **М-1**.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Фундаментальная библиотека, Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте <http://www.bio.msu.ru/>

Автореферат разослан **18 марта 2016 г.**

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологический наук

Б.А. Умарова

## ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Многие естественные звуки, в том числе и звуки речи, характеризуются сложными спектрально-временными рисунками, представляющими собой вариации частотного спектра во времени. Различение таких сигналов зависит, как от частотной, так и от временной избирательности слуха. Однако частотно-временная разрешающая способность слуха исследована недостаточно. Преимущественно она исследовалась с использованием методов, основанных на эффекте маскировки (Fletcher, 1940; Patterson, Moore, 1986; Vogten, 1974; Houtgast, 1977; Pick, 1980; Patterson, 1976; Moore et al., 1997), но такие методы не всегда позволяют предсказать, как слуховая система анализирует звуковые сигналы со сложным спектром. Поэтому актуально прямое исследование способности к различению сложных спектральных рисунков звукового сигнала.

Одним из таких сигналов стал шум с гребенчатым спектром. С использованием такого типа сигнала была рассчитана частотная разрешающая способность (ЧРС) слуховой системы, т.е. насколько дробный спектральный рисунок доступен для различения (Попов, Супин, 1984; Супин и др., 1999; Supin et al., 1994; 1998). Оказалось, что частотная избирательность, рассчитанная ранее, не может до конца объяснить полученные значения ЧРС. Кроме того, была показана корреляция между различением структуры гребенчатого спектра и различением речи для здоровых испытуемых, пациентов с нарушениями слуха, а также у пациентов с кохлеарными имплантами (Henry et al., 2005; Won et al., 2007; Anderson et al., 2011; Won et al., 2014).

Однако эти работы касались анализа «стационарных» звуковых сигналов, но, как говорилось ранее, многие натуральные звуковые стимулы характеризуются спектрально-временными рисунками, при которых их частотные спектры варьируются в течение действия сигнала: смещаются,

растягиваются, сжимаются. Поэтому представляет интерес измерить пороги обнаружения динамических изменений в сложном звуковом сигнале.

Чувствительность слуховой системы к сдвигам частотного спектра ранее уже исследовалась для простых тонов (Wier et al., 1977; Sek, Moore, 1995; Dai et al., 1995; Moore, Ernst, 2012), для комплексных тонов (Moore et al., 2005), для формант речевого сигнала (Flanagan, 1955; Hawks, 1994; Kewley-Port et al., 1996). Однако чистые тоны это идеализированный вариант сигнала. Поэтому была поставлена задача: исследовать чувствительность к динамическим изменениям в сложном звуковом сигнале. В качестве модели сложного звукового сигнала использованы сигналы с гребенчатым спектром.

Кроме того, важно установить, как звуковой сигнал воспринимается на фоне других звуков, которые по отношению к сигналу играют роль помехи (маскера). Была поставлена задача определить, как воздействие помехи сказывается на различении частотного сдвига в сложном спектре звукового сигнала.

## **Цель 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 шумовом сигнале с гребенчатым спектром, в оптимальных условиях и на фоне шума.

Задачи исследования:

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

Оценить влияние маскирующих шумов различных амплитудно-частотных характеристик на различение сдвига фазы гребенчатого спектра.

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

### **Научная новизна результатов исследования**

Впервые измерена чувствительность слуха человека к фазовым сдвигам гребенчатого спектра звукового сигнала в зависимости от характеристик такого спектра. Протестировано влияние плотности и ширины гребней спектра, центральной частоты спектра, интенсивности сигнала на различение сдвига фазы гребенчатого спектра.

При тестировании влияния маскирующего шума на различение сдвига фазы гребенчатого спектра было показано, что характер маскировки при совпадающем по частоте с сигналом маскере и при низкочастотном маскере принципиально отличается. Это может свидетельствовать о действии различных механизмов в этих двух случаях.

Для объяснения полученных результатов была предложена качественная модель, объясняющая полученные результаты и расширяющая представление о первичной обработке сложных сигналов в слуховой системе.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Определены пороги различения сдвига фазы гребенчатого спектра. Пороги зависели от плотности и ширины гребней спектра, а также от центральной частоты спектра сигнала, но не зависели от интенсивности сигнала.
2. При низкочастотном, совпадающем по частоте и высокочастотном положении маскирующего сигнала наблюдается различный характер влияния маскера на различение сдвига фазы гребенчатого спектра.
3. Модель, построенная на основе профилей возбуждения в слуховой системе, в первом приближении хорошо объясняет полученные результаты. Это свидетельствует о том, что анализ сигнала с гребенчатой структурой

спектра в слуховой системе осуществляется преимущественно «по принципу места».

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Представленная работа относится к области фундаментальных исследований функционирования слуховой системы человека. Полученные данные дополняют и расширяют наши представления о первичном анализе сложных звуковых сигналов в слуховой системе и могут быть полезными в понимании обработки речевых сигналов.

Кроме того, представленные результаты могут быть основой для дальнейшего развития методов тестирования нарушений слуха и методов подбора кохлеарных имплантов, основанных на использовании сигналов с гребенчатым спектром.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации были представлены на следующих научных конференциях:

1. 8-я международная конференция Forum of neuroscience, 14 – 18 июля 2012 г., Барселона, Испания.
2. XXII съезд физиологического общества им. И.П.Павлова, 16-20 сентября 2013 г., Волгоград, Россия.
3. VI Всероссийская конференция по «Физиологии слуха и речи», 26-28 ноября 2013 г., Санкт-Петербург, Россия.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из которых 2 статьи опубликованы в журналах из списка Scopus и Web of Science и 5 опубликованы в журналах из списка ВАК.

## **Структура и объём диссертации**

Диссертация изложена на 121 страницах, содержит 33 рисунка. Работа состоит из следующих разделов: введения, обзора литературы, методики, результатов исследования, обсуждения и списка литературы, который содержит 130 источников: 9 на русском и 121 на английском языках.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Обзор литературы**

Первая часть литературного обзора посвящена современным представлениям о частотной избирательности слуха. Рассмотрена концепция, представляющая слуховую систему как набор частотно-полосовых фильтров. Проанализированы данные по оценке частотной избирательности слуха с использованием сложных звуковых сигналов. Далее затронуты основные результаты, полученные ранее по частотным дифференциальным порогам для простых сигналов.

Во второй части рассматривается воздействие звуковых помех на слуховую систему. Приведён краткий обзор механизмов маскировки в слуховой системе и отдельно рассматривается влияние маскирующих сигналов на различение частотного сдвига как простого, так и сложного сигналов.

### **Методика исследования**

В экспериментах принимали участие восемь испытуемых в возрасте от 21 до 60 лет. Аудиограммы испытуемых соответствовали норме.

В качестве сигнала использовали узкополосный шум с гребенчатой формой спектра. Ширина спектральной полосы шума составляла одну октаву. В пределах огибающей спектр сигнала содержал периодически чередующиеся максимумы и минимумы спектральной плотности, интервалы между которыми были частотно-пропорциональны (рис. 1 А).

Количество гребней в спектре сигнала определяется параметром плотности. В экспериментах использовали следующие значения плотности: 1.4, 2.1, 3.5, 4.9, 6.3, 7 цикл/окт.

Ширину гребней спектра измеряли в процентах от интервала между гребнями и варьировали от 20 до 50% (50% - косинусоидальная исходная форма).

Для тестирования чувствительности слуха к сдвигам фазы гребенчатого спектра использовали два сигнала, которые отличались положением спектральных пиков, при этом все остальные параметры сигнала оставались прежними. Различие между положениями гребней характеризовали в процентах от частоты. Возможный максимальный сдвиг соответствует полной реверсии фазы гребней спектра.

Интенсивность сигнала при измерении частотных дифференциальных порогов варьировали от 60 до 90 дБ.

В качестве маскирующего сигнала использовали узкополосный шум, ширина спектральной полосы которого составляла одну октаву.

В работе было протестировано влияние трёх положений маскира относительно сигнала: маскир был центрирован на частоте на одну октаву ниже, чем сигнал; маскир и сигнал совпадали по центральной частоте; маскир был центрирован на частоте на одну октаву выше, чем сигнал. При тестировании влияния шума на различение частотного сдвига гребенчатого спектра использовали парадигму одновременной маскировки (рис. 1 Б).

Сигналы сначала синтезировали в цифровой форме, далее переводили в аналоговую форму, используя 16-битный цифроаналоговый преобразователь. Воспроизводили диотически, т.е. идентично на оба уха испытуемого.

Для измерения порогов использовали двухальтернативную процедуру с принудительным выбором в сочетании с адаптивным методом варьирования параметров сигнала.



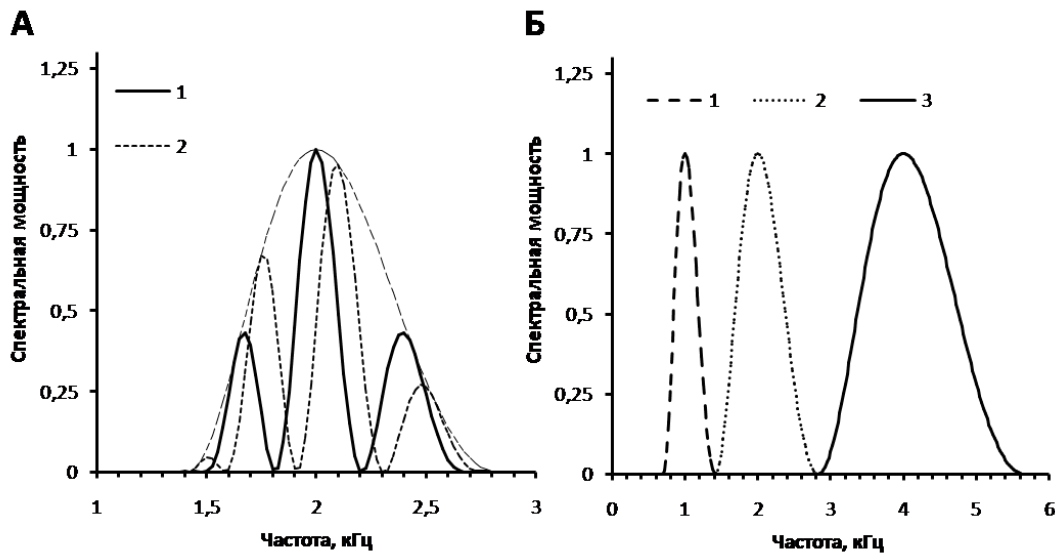


Рис. 1. А. Гребенчатый спектр сигнала, плотность 3.5 цикл/окт. 1 и 2 - спектры, сдвинутые относительно друг друга по частоте. Пунктир – огибающая спектра. Б. Спектр маскира. 1 – низкочастотный маскир, 2 - маскир, совпадающий по частоте, 3 – высокочастотный маскир.

Процедура состояла в следующем. Каждое предъявление сигнала включало две звуковые посылки длительностью по 2.4 секунды с паузой 0.4 секунды. В одной из звуковых посылок (переменный сигнал) происходил сдвиг фазы спектра сигнала – три цикла переключения от одного из двух спектров, различающихся фазой гребенчатой структуры, к другому и обратно. В другой звуковой посылке (постоянный сигнал) изменений не содержалось. Звуковые посылки чередовались от пробы к пробе в случайном порядке. Задачей испытуемого было обнаружить, в какой из двух посылок присутствуют какие-либо изменения сигнала.

Адаптивный метод варьирования параметров сигнала состоял в том, что величину сдвига фазы гребенчатого спектра в предъявляемых сигналах меняли от пробы к пробе в зависимости от ответов испытуемого в предыдущей пробе. Измерения начинали с заведомо надпорогового значения и далее в каждой последующей пробе значение устанавливали в зависимости от результата предыдущей пробы. Процедуру продолжали до получения

десяти точек перегиба. Среднее значение этих десяти экстремумов принимали за оценку порога.

На каждом испытуемом было выполнено три измерения для каждого из варьируемых параметров сигнала ( $n=24$ ). Статистическую обработку проводили в программе Statistica 8. Для сравнения нескольких групп данных использовали дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим post-hoc тестом.

## Результаты

### **Зависимость различения сдвига фазы гребенчатого спектра звукового сигнала от параметров сигнала в отсутствии маскеров**

#### Зависимость порога сдвига фазы от плотности гребней спектра и интенсивности сигнала

Использовали спектр сигнала с центральной частотой 2 кГц.

Минимальный различимый сдвиг фазы спектра наблюдался при средних значениях плотности гребенчатого спектра (от 2 до 5 цикл/окт). 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 (рис. 2А).

Интенсивность сигнала не оказывала значительного влияния на порог различения частотного сдвига (рис. 2Б).

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

Использовали спектр с центральной частотой от 0.5 до 8 кГц. Уровень сигнала составлял 70 дБ УЗД. Плотность гребней спектра изменяли от 1.4 цикл/окт до максимальной, доступной для различения.

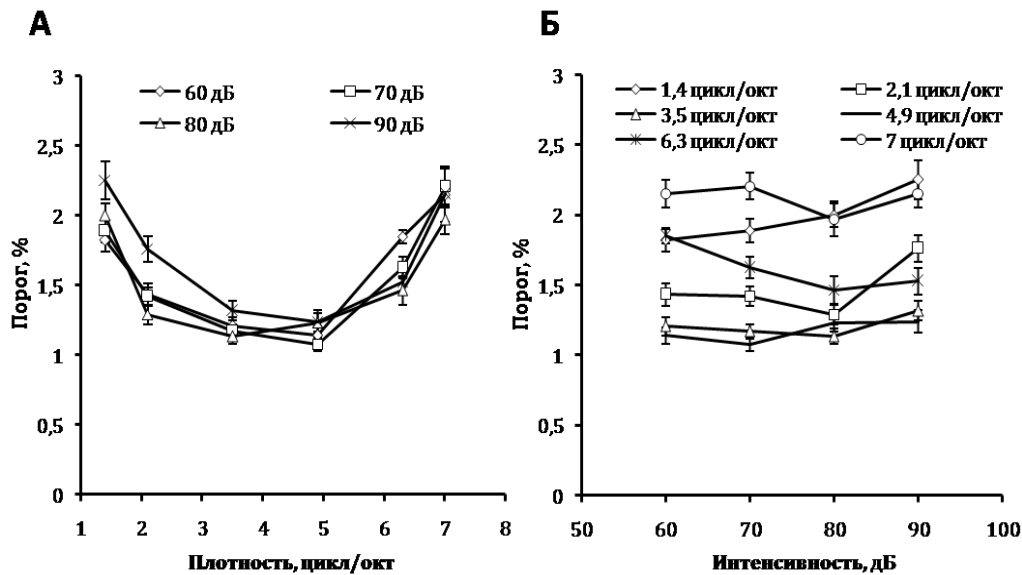


Рис. 2. А. Зависимость различения частотного сдвига спектра сигнала от плотности гребней спектра при интенсивности сигнала от 60 до 90 дБ. Б. Зависимость различения частотного сдвига гребенчатого спектра сигнала от интенсивности сигнала при плотности от 1.4 до 7 цикл/окт. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешностей соответствуют стандартным ошибкам.

На частоте 1 кГц минимальное значение порогов наблюдалось при плотности от 1.4 до 5 цикл/окт, достоверных различий между пороговыми значениями в этом диапазоне выявить не удалось ( $p > 0.05$ ). Увеличение плотности гребенчатого спектра приводило к увеличению порога. На частоте 2 кГц порог достигал максимального значения как при плотности 1.4 цикл/окт, так и при 7 цикл/окт. Пороги при плотности от 2 до 6.3 цикл/окт статистически достоверно не различались. При центральной частоте сигнала в 4 и 8 кГц удалось выявить только значение максимума и минимума порога в зависимости от плотности гребенчатого спектра. При частоте 0.5 кГц испытуемые могли различить фазовый сдвиг спектра только до плотности не выше 5 цикл/окт. При этом пороги для всех значений плотности гребней спектра, при которых доступно различение частотного сдвига, были выше, чем на остальных частотах (рис. 3А).

На частотах от 1 до 8 кГц при плотности гребней 1.4 цикл/окт наблюдался незначительный подъем порогов по сравнению с более

высокими значениями плотности. При плотности 2 цикл/окт минимальное значение порогов смещалось к 2 кГц. В диапазоне частот от 2 до 8 кГц наблюдался незначительный подъём порогов с повышением частоты. 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. При плотности 4.9 цикл/окт достоверных различий между порогоми на центральных частотах от 1 до 8 кГц обнаружено не было. Дальнейшее увеличение плотности гребенчатого спектра приводило не только к потере различия на частоте 0.5 кГц, но и к резкому росту порогов на частоте 1 кГц. Различия между порогоми для центральных частот гребенчатого спектра от 2 до 8 кГц обнаружено не было.

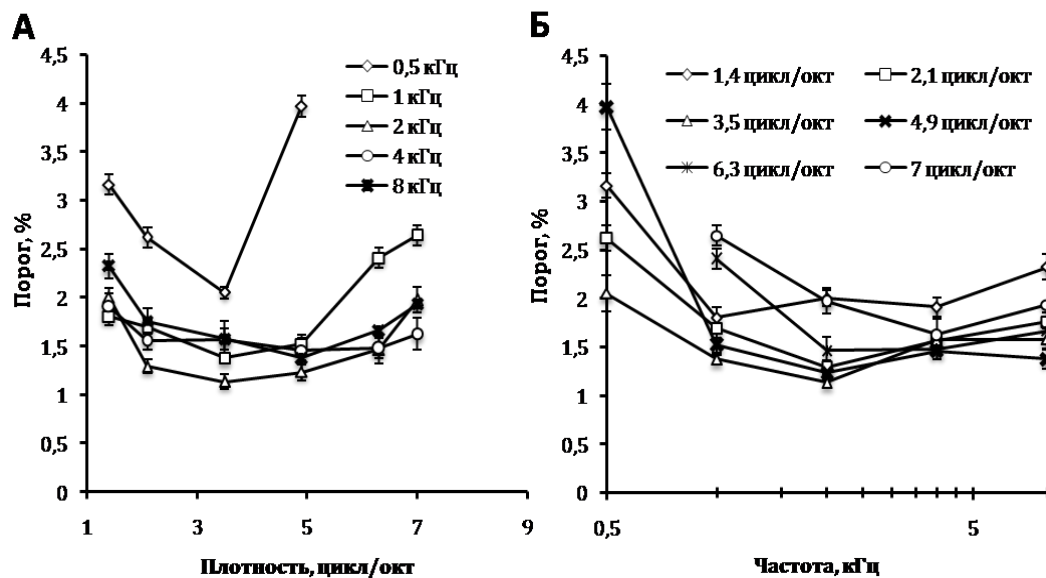


Рис. 3. А. Зависимость порога различения частотного сдвига спектра сигнала от плотности гребней спектра при центральной частоте от 0.5 до 8 кГц.

Б. 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.

### 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. Центральная частота спектра составляла 2 кГц, а интенсивность сигнала 70 дБ.

При всех значениях плотности гребней спектра порог возрастал с увеличением ширины гребней спектра (рис. 4А).

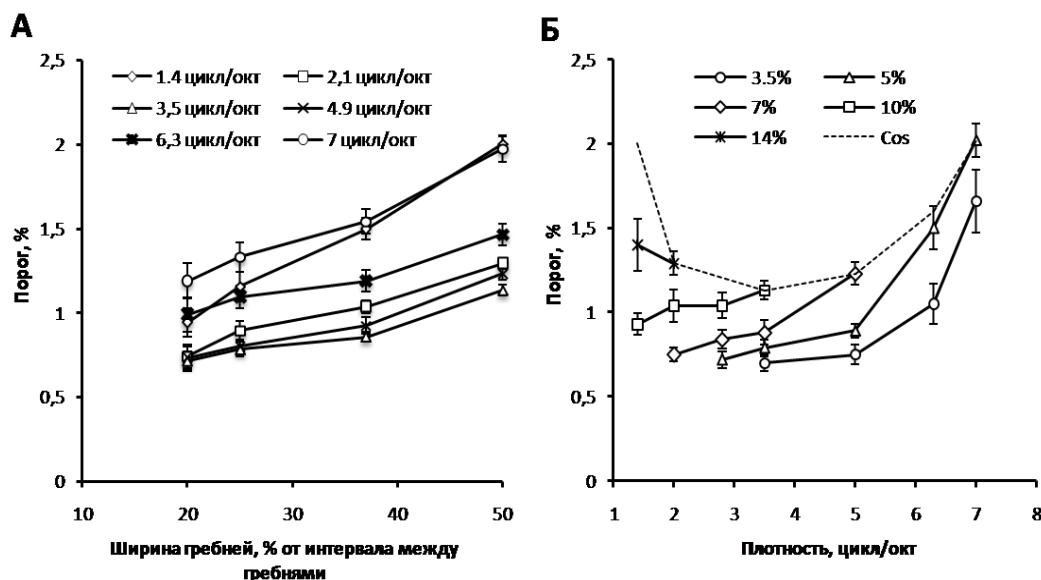


Рис. 4. А. Зависимость порогов различения частотного сдвига гребней спектра от ширины гребней при различной плотности гребней, от 1.4 до 7 цикл/окт. Б. Зависимость порогов различения частотного сдвига гребней спектра от плотности гребней при различных значениях ширины гребней, от 3.5 до 14% от центральной частоты. Cos – зависимость при косинусоидальной форме гребней спектра. Приведены средние значения по всем измерениям и стандартные ошибки.

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 процентах 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.

В отличие от косинусоидальной формы гребней спектра, при постоянной ширине гребней снижение плотности спектра приводило к снижению порогов различения частотного сдвига (рис. 4Б).

### **Влияние маскирующего шума на различение фазового сдвига гребенчатого спектра звукового сигнала**

В этих исследованиях использовался тест-сигнал, центрированный на частоте 2 кГц, с плотностью гребенчатого спектра 3.5 цикл/окт. Интенсивность маскира варьировали от 30 до 100 дБ при интенсивности сигнала в 50 дБ, и от 60 до 100 дБ при интенсивности сигнала 80 дБ.

Наибольший эффект маскировки, выражающийся в повышении порогов обнаружения сдвига гребенчатой структуры спектра, был получен при использовании маскира, совпадающего по частоте со спектром сигнала. При использовании сигнала интенсивностью 50 дБ УЗД повышение порогов наблюдалось, начиная с интенсивности маскира 50 дБ УЗД (соотношение маскер/сигнал 0 дБ), а полная маскировка сигнала наступала при интенсивности маскира 60 дБ УЗД (соотношение маскира/сигнал 10 дБ). При сигнале 80 дБ УЗД, эффект маскировки возникал при интенсивности маскира 80 дБ УЗД, когда интенсивность маскира достигала 90 дБ УЗД (отношение маскер/сигнал 10 дБ), происходила полная потеря способности к различению частотного сдвига гребенчатого спектра (рис. 5).

При низкочастотной маскировке кривая зависимости порога от интенсивности маскира была более плавной. В случае интенсивности сигнала 50 дБ УЗД, порог различения изменялся по сравнению с контролем, начиная с интенсивности маскира выше 70 дБ УЗД, а полная потеря к способности различать сдвиг фазы спектрального рисунка наступала при интенсивности маскира 90 дБ УЗД (соотношение маскер/сигнал 40 дБ). При интенсивности

сигнала 80 дБ УЗД значительный эффект наблюдался, начиная с интенсивности маскира 85 дБ УЗД. При интенсивности маскира 100 дБ УЗД (отношение маскир/сигнал 20 дБ) испытуемые теряли способность различить частотный сдвиг гребенчатого спектра (рис. 5).

Высокочастотный маскир в обоих случаях не оказывал заметного влияния на различения сдвига фазы гребенчатого спектра (рис. 5).

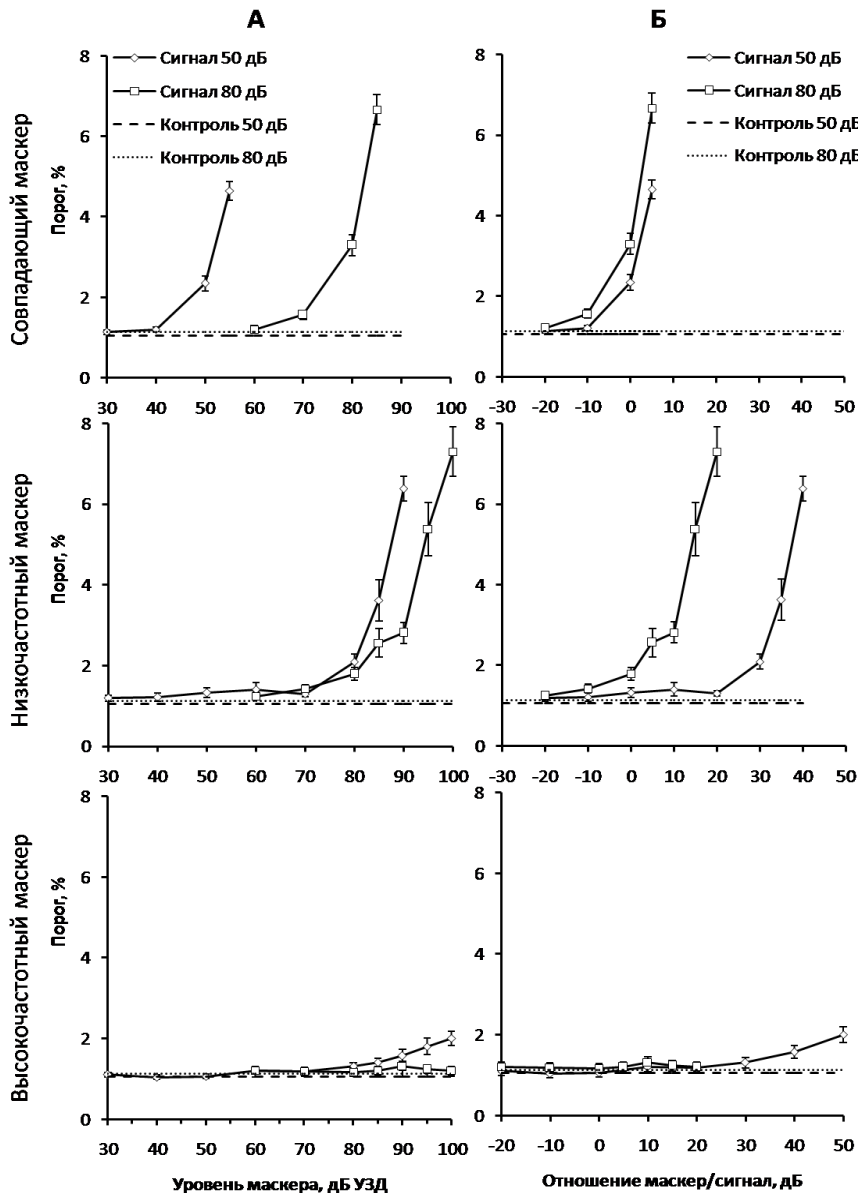


Рис. 5. Зависимость порогов различения сдвига фазы гребенчатого спектра от интенсивности маскира (А) и от отношения интенсивностей маскир/сигнал (Б), для трёх положений маскира. Приведены средние значения по всем измерениям. Планки погрешностей – стандартные ошибки. Контроль – значение порогов в отсутствии маскирующего шума.

Приведённые выше данные показывают, что характер маскировки различается для совпадающего и низкочастотного маскера. Сравнение указывает на то, что в случае совпадающих по частотной полосе маскера и сигнала, роль играет отношение интенсивности маскера и сигнала: именно это отношение определяет эффект маскировки. Для низкочастотной маскировки основное значение имеет абсолютная интенсивность (УЗД) маскера.

## **Обсуждение**

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

В соответствии с современными представлениями частотный сдвиг спектра, как простого, так и сложного звукового сигнала, может различаться благодаря участию двух механизмов: анализ по принципу места, т.е. на основе представительства звуковых частот в слуховой улитке по принципу места; анализ, основанный на временной структуре потока нервных импульсов, поступающих из улитки, «временной анализ».

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, но, однако, имеет скрытую временную структуру, которая проявляется в его автокоррелограмме. И временной анализ гребенчатого шума возможен только на основе его автокоррелограммы.

Автокоррелограмма гребенчатого спектра содержит два компонента: начальный сегмент и его копию с некоторой задержкой. Когда происходит сдвиг фазы гребней спектра, происходит изменение задержки второго компонента, но основная «макроструктура» автокоррелограммы остаётся неизменной. Этот сдвиг будет пропорционален частотному сдвигу гребней спектра. Таким образом, пороги различения частотного сдвига должны быть



либо пропорциональны расстоянию между гребнями (т.е. монотонно изменяться с изменением плотности гребней), либо не зависеть от расстояния между гребнями. Но это 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. Такие изменения будут составлять микросекунды. По мнению автора такое временное различие не доступно для слуховой системы, если речь не идёт о бинауральном анализе сигналов.

Исходя из вышесказанного, роль временного анализа при анализе шума с узкополосным гребенчатым спектром и частотно-пропорциональным расположением гребней сомнительна. И более вероятным механизмом при анализе сложных спектров нам представляется «частотный» анализ – анализ по принципу места.

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

#### Зависимость порога сдвига фазы от интенсивности сигнала

Интенсивность звукового сигнала в диапазоне от 60 до 90 дБ УЗД не оказывала значительного влияния на пороги различения сдвига фазы гребенчатого спектра.

Объяснение состоит в том, что при повышении интенсивности звукового сигнала слуховой фильтр не просто расширяется, а изменяется соотношение пика фильтра и его широкой нижней части (Glasberg, Moore, 2000). До тех пор, пока вклад пиковой части существенно превышает вклад основания фильтра в передачу сигнала, форма пиковой части характеристики остаётся практически неизменной. Пик фильтра будет преобладать в широком диапазоне интенсивностей, и переломная точка будет располагаться от 90 до 100 дБ. В данной работе использовали интенсивность от 60 до 90 дБ, в этих пределах форма фильтра изменяется незначительно, следовательно, и различие спектральной структуры сигнала не изменится

#### 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 не монотонна. При уменьшении ширины гребней спектра, различие частотного сдвига улучшается.

Исходя из модели построения профилей возбуждения в слуховой системе, мы предполагаем, что порог различения частотного сдвига ( $\text{Thr}$ ) достигается, когда сдвиг профиля возбуждения достигнет некоторого критического значения ( $\text{Cr}$ ).

Когда плотность гребенчатого спектра невелика, профиль возбуждения воспроизводит структуру спектра без значительных изменений (рис. 6 1А). Однако, так как получаемый профиль возбуждения довольно пологий, то необходимое значение  $\text{Cr}$  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 профиле возбуждения будет увеличиваться. При этом меньший частотный сдвиг удовлетворяет необходимому значению  $\text{Cr}$ . Дальнейшее увеличение плотности гребней спектра (3А) приведёт к дальнейшему уменьшению глубины модуляции спектра (3В). При этом

больший 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.

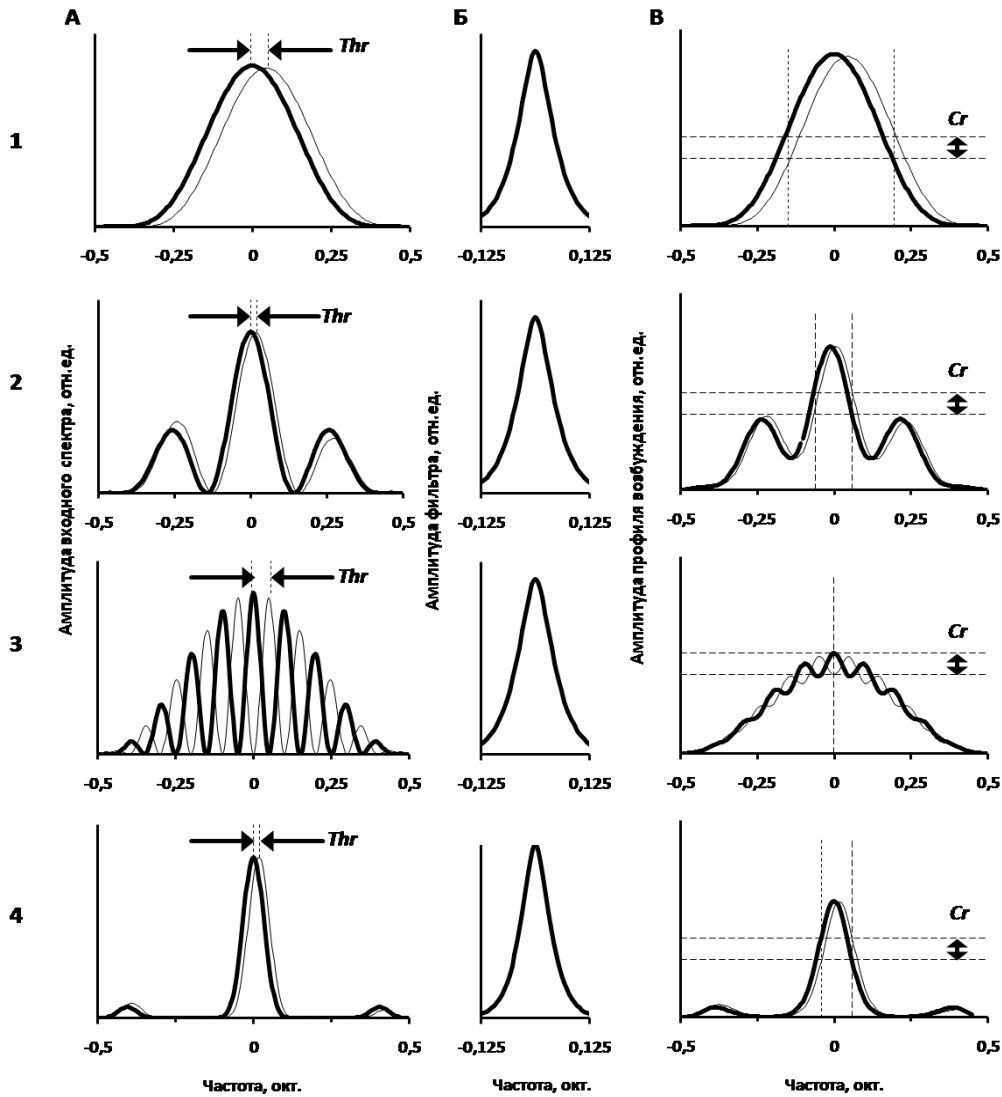


Рис. 6. Модель взаимодействия гребенчатых спектров с гипотетическим слуховым фильтром. А. Фрагмент гребенчатой структуры спектра; Б. Форма слухового фильтра; В. Профиль возбуждения, получаемый путём свёртки А и Б. Толстая и тонкая линии - два спектра, сдвинутые один относительно другого по частотной 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.

Приведённая модель хорошо описывает полученную немонотонную зависимость порогов от плотности гребней спектра, а также зависимость от ширины гребней спектра. Расчёт того, соответствуют ли полученные экспериментальные данные предсказаниям модели, также подтверждает, что модель, основанная на построении профилей возбуждения, хорошо описывает экспериментальные данные (рис. 7). На основании этого можно утверждать, что значительную роль в различении частотного сдвига сигнала с гребенчатым спектром играет механизм частотного анализа по принципу места.

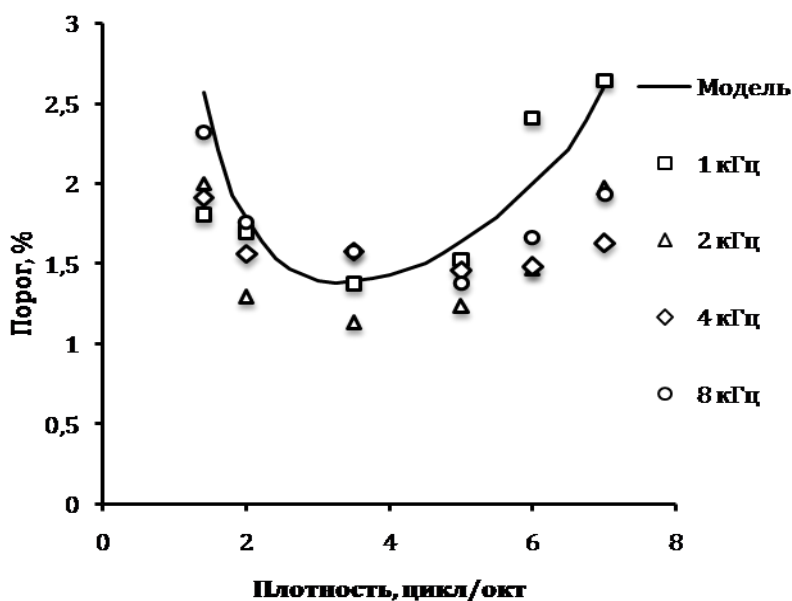


Рис. 7. Результаты моделирования - зависимости порога различения сдвига фазы гребней спектра от плотности (линия – предсказанный результат модели при эквивалентной прямоугольной ширине фильтра 10% от центральной частоты и значении  $S_t = 1$  дБ; точки – значения, полученные в эксперименте).

### Влияние помех различной конфигурации на различение сдвига фазы гребенчатого спектра

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.

Полученные результаты можно объяснить, используя также модель профилей возбуждения. Но в данном случае будет использоваться форма слухового фильтра, которая зависит от интенсивности входного сигнала.

Эффект маскировки, возникающий при совпадающих по частоте маскере и сигнале, вероятнее всего обусловлен механизмом энергетической маскировки.

Маскер, накладываясь на сигнал, уменьшает глубину модуляции спектра и, следовательно, глубину модуляции профиля возбуждения, возникающего в слуховой системе. Чем выше интенсивность маскера, тем меньше глубина модуляции профиля возбуждения. Вследствие этого сдвиг профиля возбуждения, возникающий в результате сдвига спектра входного сигнала (рис. 8 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 станет меньше дифференциального порога по интенсивности.

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 будет недостаточным даже при большой интенсивности маскера (рис. 8 3В). Более вероятным механизмом, обеспечивающим низкочастотную маскировку, будет эффект латерального подавления, который снижает эффективность работы активного механизма. С повышением интенсивности низкочастотного маскера 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, причём решающим фактом является именно абсолютная интенсивность маскира (УЗД).

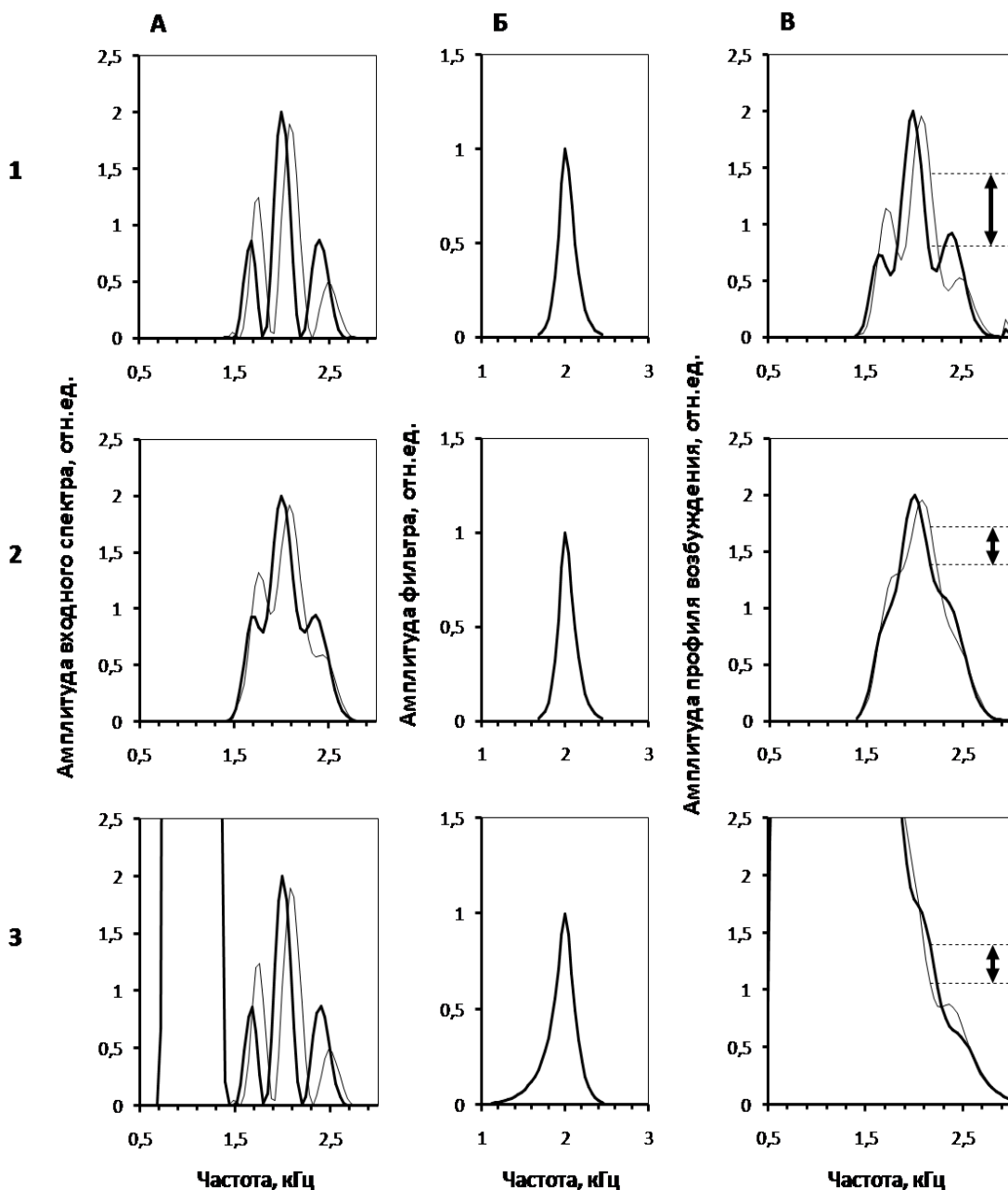


Рис. 8. Модель взаимодействия гребенчатых спектров и маскером.

А – входной сигнал: сумма сигнала и маскира; Б – форма слухового фильтра; В – профиль возбуждения, получаемый путём свёртки А и Б. Толстая и тонкая 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 маскира; 2 – сигнал и совпадающий по частоте маскер; 3 – сигнал и низкочастотный маскер; Стрелками показана величина сдвига в профиле возбуждения.

При высокочастотном маскере не выявлено значительного эффекта маскировки. Это также можно объяснить предложенной моделью, поскольку повышение интенсивности маскера 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 различение частотного сдвига спектра сигнала, расположенного на частотной шкале ниже маскера.

Рассчитаем, соответствуют ли полученные экспериментальные данные предсказаниям модели. Расчёт показывает, что экспериментальные результаты могут быть, хотя и не полностью, объяснены предложенной моделью. Для маскера, совпадающего по частоте с сигналом, модель даёт хорошее совпадение с экспериментальными данными (рис. 9А). Однако некоторые расхождения предсказаний модели и экспериментальных данных имеет место при анализе эффектов низкочастотной маскировки (рис. 9Б). 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 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.

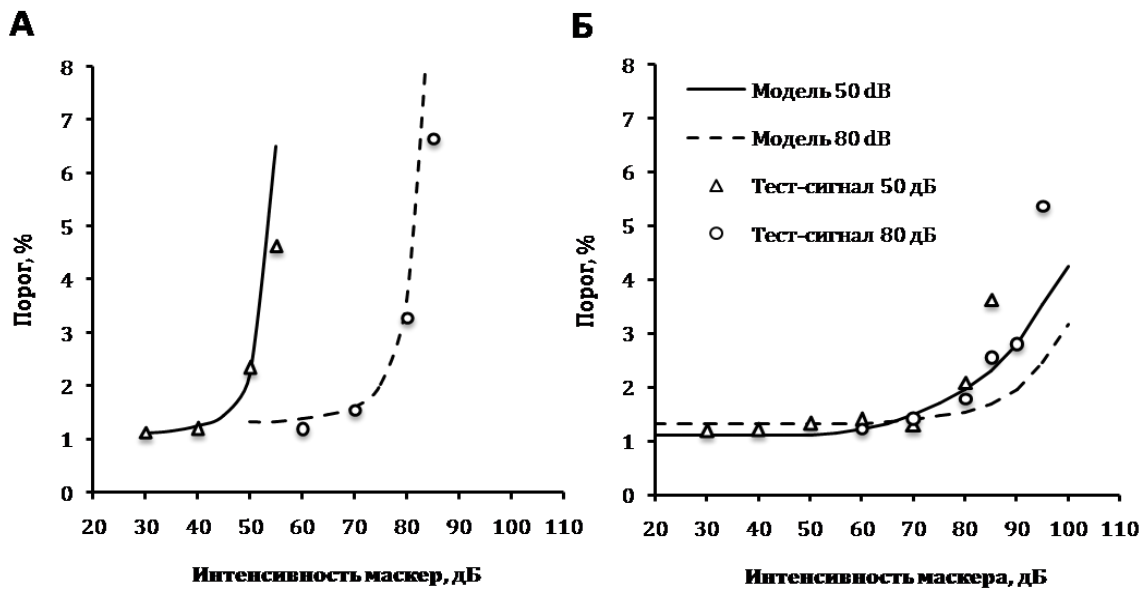


Рис. 9. Сравнение теоретических расчётов с экспериментальными данными по влиянию маскировки на различие сдвига гребенчатого спектра. А. Маскер и сигнал совпадают по частоте. Б. Маскер ниже по частоте, чем сигнал. Линия – предсказанный результат модели; точки – значения, полученные в эксперименте.

## 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 тоновых 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 (около 3.5 цикл/окт.) 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 прежде всего по принципу места.
8. Эффективность маскировки шумом, совпадающим по частоте с сигналом, зависела преимущественно от отношения интенсивностей маскира и сигнала. Маскировка осуществляется 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи:**

1. Нечаев Д.И., Супин А.Я. Чувствительность слуха человека к смещениям спектрального рисунка звукового сигнала // Сенсорные системы. 2011. Т. 25. № 2. С. 161 – 167.
2. Nechaev D.I., Supin A.Ya. Hearing sensitivity to shifts of rippled-spectrum patterns // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 134. P. 2913 – 2922.
3. Нечаев Д.И., Милёхина О.Н., Супин А.Я. Чувствительность слуха к смещениям спектрального рисунка в зависимости от формы спектра звукового стимула // Сенсорные системы. 2013. Т. 27. № 2. С. 160 – 170.
4. Нечаев Д.И., Милёхина О.Н., Супин А.Я. Влияние шумовых помех различной конфигурации на чувствительность к динамическим изменениям спектрального рисунка звукового сигнала // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 3. С. 68 – 75.

5. Нечаев Д.И., Милёхина О.Н., Супин А.Я. Влияние маскировки на чувствительность слуха к динамическим изменениям спектрального рисунка звукового сигнала в зависимости от отношения интенсивностей маскира и сигнала // Сенсорные системы. 2015. № 1. С. 63 – 73.
6. Nechaev D.I., Milekhina O.N., Supin A.Ya. Hearing sensitivity to shifts of rippled-spectrum sound signals in masking noise // PLoS ONE 10 (10). 2015. e0140313.

#### **Тезисы докладов:**

1. Nechaev D.I. Sensitivity of human`s hearing to shifts of spectrum patterns of sound // Abstracts of the 8<sup>th</sup> European forum of neuroscience (FENS) – Barcelona, Spain, July 14-18, 2012.
2. Нечаев Д.И., Милёхина О.Н., Супин А.Я. Чувствительность слуха к смещениям спектрального рисунка при различной форме спектра звукового сигнала // XXII съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова: Тез. Докл. –Волгоград: Изд-во ВолгГМУ, 2013. – 380 с.
3. Нечаев Д.И., Милёхина О.Н., Супин А.Я. Влияние шума на чувствительность слуха человека к динамическим изменениям спектра звукового сигнала // VI Всероссийская конференция-школа, посвященная памяти чл.-корр. АН СССР Г.В. Гершуни «Физиология слуха и речи». Тез. Докл. С.-Петербург., 2013. 12 с.