АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 4, с. 545–553

АКУСТИКА ЖИВЫХ СИСТЕМ. БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 612.85

РОЛЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ГОЛОВЫ В ОЦЕНКЕ ВИРТУАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

© 2010 г. Е. С. Малинина, И. Г. Андреева

Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН

194223 Санкт-Петербург, просп. М. Тореза 44

E-mail: malinina-es@mail.ru; ig-andreeva@mail.ru

Поступила в редакцию 18.08.09 г.

Психофизическое исследование по оценке стимулов, имитирующих движение источника звука между точками пространства с координатами от –45° до 45° элевации (азимут 0°), выполнено с участием слушателей 57–73 лет методом имитации движения, основанным на использовании реальной передаточной функции головы и реконструкции спектральных компонентов, характерных для этой функции. Точность опознания слушателями направления движения возрастала в следующей последовательности способов имитации: движение имитировалось смещением спектрального минимума в отрезках широкополосного шума в диапазоне 5–12 кГц (ширина минимума составляла 1 кГц и была постоянна); изменением ширины спектрального минимума в диапазоне 6–12 кГц; изменением ширины спектрального максимума в диапазоне 4–8 кГц; изменением ширины спектрального минимума и максимума; смещением спектрального минимума и изменением ширины спектрального максимума; смещением спектрального минимума и изменением ширины и мощности спектрального максимума. Для последнего стимула средняя вероятность правильных ответов (90 ± 5%) достоверно не отличалась от таковой для стимула, синтезированного на основе реальной передаточной функции (94 ± 3%), которая использовалась в качестве образца при реконструкции спектральных компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано, что локализация источника звука в вертикальной плоскости основана на информации, извлекаемой слуховой системой человека и животных из так называемых передаточных функций головы [1–3], которые являются результатом преобразования звукового сигнала при его переходе из свободного звукового поля к барабанной перепонке. В результате этого преобразования в первичном спектре широкополосного звукового сигнала происходит усиление или ослабление отдельных спектральных компонентов, зависимое от направления источника звука. В ранних исследованиях было показано, что систематическое смещение первого спектрального минимума (спектральной вырезки) в передаточных функциях головы человека в частотном диапазоне от 6 до 12 кГц соответствует сдвигу угла элевации источника звука снизу вверх [4]. Основной спектральный максимум (пик) в передаточных функциях головы, по данным этой работы, приходится на частоту 4 кГц, т.е. предшествует спектральному минимуму, и не обнаруживает заметной связи с положением источника звука. Позже, однако, были получены доказательства, что область частот, значимых для локализации по вертикали, захватывает как область смещения первого спектрального минимума, так и область основного спектрального максимума [5]. Несмотря на длительную дискуссию о роли спектральных минимумов и максимумов в локализации источника звука, окончательно этот вопрос не решен [6, 7]. Вместе с тем, решение этого вопроса имеет немаловажное значение в связи с разработкой стимулов, имитирующих движение источника звука по вертикали.

На современном этапе моделирование перемещения источника звука по вертикали связано с регистрацией и воспроизведением параметров передаточных функций, отражающих положение источника звука в пространстве. Недостаток этого подхода заключается в том, что передаточные функции, отражающие одну и ту же точку пространства, могут значительно отличаться у разных людей [5]. Насколько важна эта индивидуализация передаточных функций для локализации источника звука, окончательно не установлено даже для неподвижных звуков, и не исследова-

лось для движущихся звуков. С одной стороны, было показано, что неподвижные звуки, синтезированные с использованием собственных передаточных функций, локализуются точнее, чем с использованием чужих (неиндивидуализированных) передаточных функций [8]. С другой стороны, существуют данные, что сглаживание или усреднение индивидуальных передаточных функций не вызывает нарушения локализации неподвижных звуков [7, 9]. При том, что спектральный анализ передаточных функций выполнялся неоднократно [5, 6], не вполне ясно, какие их характеристики могут обеспечить возможность сходной локализации стимулов в виртуальном акустическом пространстве у большинства, в идеале – у всех слушателей.

Приступая к созданию стимулов, имитирующих движение источника звука в вертикальной плоскости, мы пытались оценить вклад различных параметров передаточных функций в локализацию движущегося источника звука в этой плоскости. Предварительно нами было выполнено исследование по оценке звуковых стимулов, имитирующих движение источника звука по вертикали на основе неиндивидуализированных передаточных функций головы различных слушателей [10]. Было показано, что для определения направления виртуального движения испытуемые 19–27 лет в качестве признаков локализации используют не только регулярное смещение спектрального минимума по частотной шкале, но и динамическое изменение общей мощности стимулов. По данным спектрального анализа, изменение общей мощности стимулов было обусловлено, главным образом, динамическими изменениями мощности спектральных компонентов в области спектрального максимума. Мы не могли, однако, исключить, что менее выраженные изменения мощности спектральных компонентов в области смещения спектрального минимума все-таки могли иметь значение для локализации источника звука в вертикальной плоскости. Поэтому задачей настоящего исследования было определение вклада изменений мощности в двух полосах частот, характерных для смещений спектральных минимумов и максимумов в передаточных функциях головы, в оценку направления движения источника звука по вертикали. Учитывая, что вопрос о роли высоких и низких частот для локализации источника звука по вертикали является особенно важным для слушателей старшего возраста с характерным снижением слуховой чувствительности на высоких частотах [11, 12], исследования выполнены с участием слушателей 6–8 декады жизни.

МЕТОДИКА

В экспериментах участвовало 10 испытуемых в возрасте 57–73 лет (трое мужчин, семь женщин, средний возраст – 65 лет). Слуховая чувствительность испытуемых оценивалась при помощи тональной пороговой аудиометрии (диапазон частот 125 Гц – 10 кГц, клинический аудиометр МА-31, Германия). Снижение слуха на 30 дБ и более на высоких частотах либо для одного уха, либо для обоих ушей было отмечено у всех испытуемых: у трех испытуемых снижение слуха проявлялось только на частоте 10 кГц, у трех испытуемых – начиная с частоты 8 кГц, у двух испытуемых – начиная с частоты 4 кГц, у двух испытуемых – начиная с частоты 2 кГц.

В работе использовали звуковые стимулы, имитирующие движение источника звука в вертикальной плоскости на основе передаточной функции головы и спектральных компонентов, характерных для этой функции. Стимул состоял из двух сигналов, подаваемых на левое и правое уши испытуемых. Все сигналы были сформированы из 17 отрезков широкополосного шума (ширина полосы 0.5–16 кГц), длительность каждого отрезка составляла 50 мс, время нарастания-спадения – 5 мс. Отрезки шума частично перекрывались таким образом, чтобы исключить перепады интенсивности между ними и обеспечить непрерывность звучания. Общая длительность сигналов составляла 940 мс. Схема формирования сигналов приводилась нами в работе [10].

В качестве базового при реконструкции спектральных компонентов использовался стимул, сознанный на основе передаточных функций головы слушателя № 119 из банка передаточных функций "CIPIC" лаборатории университета Калифорнии, США, записанных отдельно для левого и правого ушей. Стимул № 119 был отобран на основании предварительной оценки 23 комплектов неиндивидуализированных передаточных функций различных слушателей. Направление виртуального движения стимулов, синтезированных на основе комплекта функций № 119, опознавалось как молодыми (19–27 лет), так и пожилыми (52–73 года) испытуемыми с наибольшей вероятностью по сравнению со стимулами, синтезированными на основе остальных 22 комплектов из того же банка передаточных функций [10]. Имитация движения стимула № 119 осуществлялась за счет преобразования отрезков шума набором передаточных функций, соответствующих последовательным положениям источника звука с шагом 5.6° между точками пространства с координатами по элевации от –45 до +45° при движении вверх и от +45 до –45° при движении вниз (азимут 0°). Сонограмма сигнала № 119 для левого уха приводится на рис. 1, а. Динамические изменения сигнала № 119 для левого уха были сле-

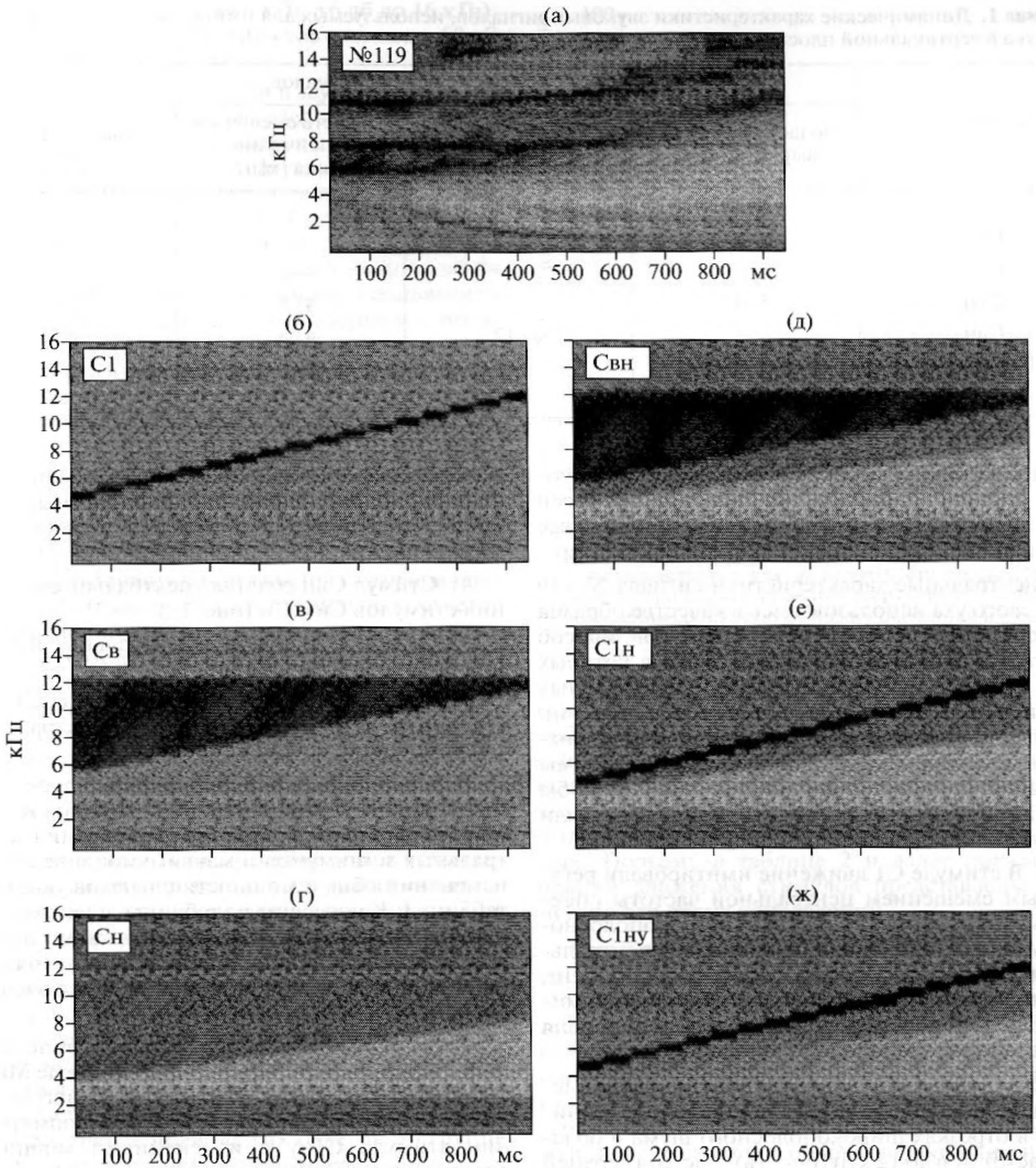

Рис. 1. Сонограммы звуковых сигналов, используемых при имитации движения источника звука вверх. Обозначения стимулов приводятся на сонограммах. Движение имитируется: а – на основе передаточных функций субъекта № 119 для левого уха; б – регулярным смещением спектрального минимума в отрезках шума; в – изменением ширины спектрального минимума; г – изменением ширины спектрального максимума; д – изменением ширины спектральных минимума и максимума; е – сочетанием смещения спектрального минимума и изменения ширины спектрального максимума; ж – сочетанием смещения спектрального минимума и изменения ширины и мощности спектрального максимума.

По оси абсцисс – время, мс; по оси ординат – частота, кГц; более темные участки сонограмм соответствуют ослаблению частотных компонентов сигнала, более светлые – усилению.

дующими: диапазон смещения первой спектральной вырезки составлял 6–12 кГц, величина изменения общей мощности составляла 7.4 дБ. Динамические изменения сигнала № 119 для правого уха имели сходные параметры. При имитации движения вверх спектральная вырезка сме-

Таблица 1. Динамические характеристики звуковых сигналов, используемых для имитации движения источника звука в вертикальной плоскости

Вид стимула	Характеристики сигналов			
	Область смещения вырезки (кГц)	Область смещения нижней границы вырезки (кГц)	Область смещения верхней границы пика (кГц)	Изменение общей мощности (дБ)
С1	5–12	–	–	–
Св	–	6–12	–	1.4
Сн	–	–	4–8	3.7
С1н	5–12	–	4–8	3.7
Свн	–	6–12	4–8	4.3
С1ну	5–12	–	4–8	6.8
№119	6–12	–	5–10	7.4

щалась в сторону высоких частот, мощность обоих сигналов нарастала на протяжении всей длительности. При имитации движения вниз все изменения сигналов носили обратный характер.

Спектральные характеристики сигнала № 119 для левого уха использовались в качестве образца при создании шести звуковых стимулов, способ имитации движения источника звука в которых был основан на реконструкции спектральных максимумов и минимумов, а также их сочетаний. Эти шесть стимулов были сформированы из сигналов, идентичных для обоих ушей. Сонограммы сигналов приводятся на рис. 1б–1ж. Способы имитации движения источника звука вверх были следующими:

1). В стимуле С1 движение имитировали регулярным смещением центральной частоты спектрального минимума в отрезках широкополосного шума (рис. 1б). Диапазон смещения центральной частоты минимума составлял от 5 до 12 кГц, ширина минимума составляла 1 кГц, глубина минимума – 40 дБ относительно основного уровня шума.

2). В стимуле Св движение имитировали смещением нижней границы спектрального минимума в отрезках широкополосного шума в области частот от 6 до 12 кГц (рис. 1в). Частота верхней границы спектрального минимума составляла 12.5 кГц и не менялась, глубина спектрального минимума была 20 дБ. Буква “в” в обозначении сигнала подразумевает, что спектральные изменения моделировали в области относительно высоких частот.

3). В стимуле Сн движение имитировали смещением верхней границы спектрального максимума в отрезках широкополосного шума в области частот 4–8 кГц (рис. 1г). Частота нижней границы спектрального максимума составляла 2.5 кГц и не менялась, превышение спектральных компонентов максимума над общим уровнем шума составляло 12 дБ. Буква “н” в обозначении стимула подразумевает, что спектральные изменения моделировали в области относительно низких частот.

4). Стимул Свн сочетал спектральные изменения стимулов Св и Сн (рис. 1д).

5). Стимул С1н сочетал спектральные изменения стимулов С1 и Сн (рис. 1е).

6) Стимул С1ну отличался от стимула С1н постепенным усилением мощности спектрального максимума от 0 до 12 дБ (рис. 1ж).

При имитации движения вниз все спектральные и амплитудные изменения стимулов носили обратный характер. Границы смещения спектральных минимумов и максимумов и величины изменений общей мощности сигналов указаны в таблице 1. Как следует из таблицы, спектральные изменения, используемые для имитации движения, приводили к существенным изменениям общей мощности всех сигналов, за исключением сигнала С1.

Формирование и запись сигналов, используемых в эксперименте, осуществляли в среде Matlab (MathWork Co., USA). Параметры фильтров для быстрого преобразования Фурье при формировании стимула С1ну с изменениями мощности спектральных компонентов задавали в программе Cool Edit Pro 1.0. Все сигналы первоначально записывали как монофайлы в формате .wav с частотой дискретизации 44.1 кГц и разрешением по амплитуде 24 бита. В программе Adobe Audition 1.5 частота дискретизации менялась на 96 кГц, разрешение по амплитуде – на 32 бита, в этой же программе выполнялся анализ спектра и аналоговой формы сигналов. При помощи звуковой платы Gina 24 (Echo Audio, США) сигналы преобразовывали в аналоговую форму и предъявляли слушателю бинаурально через внутриушные излучатели типа Etymotic ER-6i isolator (диапазон воспроизводимых частот: 20 Гц–16 кГц, нерав-

номерность АЧХ: ±3 дб до 6 кГц, ±6 дб до 16 кГц). Уровень интенсивности стимулов составлял 50 дБ над порогом слышимости.

Эксперименты проводили в звукоизолированной комнате. Испытуемый сидел в удобном кресле. Задача испытуемого состояла в том, чтобы определить направление виртуального движения звуковых стимулов (вверх или вниз) и нажать соответствующую кнопку. Для большего внимания и сосредоточенности задание выполнялось с закрытыми глазами. Перед выполнением задания проводили обучение: испытуемому предъявляли по три стимула, поочередно движущихся вверх или вниз, и сообщали о направлении движения. Все виды стимулов предъявляли сериями по 20 предъявлений (10 стимулов имитировали движение источника звука вверх и 10 – вниз), серии повторялись дважды. Стимулы внутри серий следовали с межстимульным интервалом 3 с. Порядок предъявления стимулов, имитирующих движение вверх и вниз внутри серий, и серий стимулов разных видов был случайным.

Для характеристики опознания стимулов вначале подсчитывали число правильных ответов при опознании каждого из направлений движения в двух отдельных сериях каждым испытуемым. Таким образом, для каждого испытуемого получали четыре оценки: две из них – для движения вверх и две – для движения вниз. Затем вычисляли среднюю вероятность правильных ответов для обоих направлений движения по двум сериям для каждого испытуемого и по группе в целом. Использовали следующие показатели оценки стимулов: 1) количество случаев правильного опознания направления движения в отдельных сериях (за порог опознания принимали 70% правильных ответов каждым испытуемым); 2) количество случаев неправильного опознания – "переворотов" направления движения в отдельных сериях (за порог неправильного опознания принимали 30% правильных ответов); 3) количество испытуемых, опознавших направление движения при усреднении данных по обоим направлениям движения и двум сериям; 4) средняя вероятность правильных ответов по группе испытуемых. Сравнение распределений средних вероятностей правильных ответов при оценке направления движения по группе из 10 испытуемых проводили с применением непараметрической статистики (тест Вилкоксона).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Суммарные результаты оценки направления виртуального движения звуковых стимулов 10 испытуемыми представлены на рис. 2 и в таблице 2. Прежде всего, отметим, что достоверных различий в опознании движения стимулов вверх и вниз выявлено не было (рис. 2). Наиболее существенные различия в опознании движения вверх и вниз наблюдались для стимула С1, движение которого имитировалось только смещением по частотной оси спектрального минимума в шуме (при постоянной ширине минимума 1 кГц), однако и они не были достоверны в силу большого разброса данных. Поэтому в таблице 2 и далее показатели оценки движения стимулов представлены совместно для обоих направлений.

Рис. 2. Суммарные по группе из 10 испытуемых оценки направления виртуального движения.

По оси абсцисс – вероятность правильных ответов при оценке движения вверх, %; по оси ординат – вниз. Диагональ большого квадрата (пунктирная линия) соответствует равной вероятности правильных ответов при оценке движения вверх и вниз. Сплошные линии соответствуют порогу опознания направления движения на уровне 70%.

Опознание стимула С1 характеризовалось худшими по сравнению с другими стимулами показателями оценки направления движения (рис. 2, таблица 2). Для этого стимула отмечалось наименьшее количество правильных опознаний и наибольшее количество переворотов направления движения в отдельных сериях опытов. При усреднении данных по обоим направлениям движения и двум сериям опытов только один испытуемый превысил порог опознания. Значение средней вероятности правильных ответов при оценке направления движения стимула С1 по всем 10 испытуемым составляло 53 ± 8% и было ниже порога опознания. Распределение средних вероятностей правильных ответов при оценке направления движения стимула С1 по 10 испытуемым достоверно отличалось от аналогичных распределений для всех остальных стимулов ($p < 0.01$ для стимула Св, $p < 0.001$ для других стимулов).

Значения средней вероятности правильных ответов при оценке направления виртуального движения для этих оставшихся стимулов превы-

Таблица 2. Показатели оценки направления виртуального движения для группы из 10 слушателей

Вид стимула	Количество опознаний	Количество переворотов	Число слушателей, опознавших направление движения	Средняя вероятность правильных ответов (%)
С1	10	7	1	53 ± 8
Св	26	5	7	73 ± 9
Сн	32	5	8	79 ± 9
С1н	30	6	8	79 ± 9
Свн	33	4	8	83 ± 8
С1ну	37	0	10	90 ± 5
№119	39	0	10	94 ± 3

Примечание. Опознание – случай превышения слушателем 70% правильных ответов при оценке 10 сигналов, движущихся в одном направлении. Переворот – случай неправильного опознания слушателем 10 стимулов, движущихся в одном направлении (менее 30% правильных ответов). Слушатель считался опознавшим направление движения, если при усреднении данных по обоим направлениям движения и двум сериям он превысил порог опознания. Средняя вероятность правильных ответов определялась по всей группе испытуемых, $N = 400$, рядом со средним значением доверительный интервал на уровне 95%.

сили порог опознания, но показатели оценки движения существенно различались. Относительно невысокие показатели опознания направления движения были отмечены для стимула Св, движение в котором имитировалось смещением нижней границы спектрального минимума в шуме в области высоких частот 6–12 кГц (рис. 2, таблица 2). Значение средней вероятности правильных ответов при оценке направления движения стимула Св по всем 10 испытуемым составляло 73 ± 9%. Промежуточные значения показателей опознания были отмечены для стимулов Сн, С1н и Свн, при имитации движения которых было использовано смещение верхней границы спектрального максимума в области относительно низких частот – 4–8 кГц. Значения средней вероятности правильных ответов при оценке направления движения по всем 10 испытуемым для стимулов Сн и С1н составляли 79 ± 9%, для стимула Свн – 83 ± 8%.

Наиболее высокие показатели опознания направления движения были зарегистрированы для стимула С1ну и стимула № 119, созданного на основе передаточных функций головы. Характерной особенностью этих двух стимулов являлось то, что они включали не только смещения минимума и максимума по частотной шкале, но и дополнительное изменение мощности спектральных компонентов в области максимума. Таким образом, спектральные характеристики стимула С1ну были более приближены к спектральным характеристикам стимула № 119, созданного на основе реальной передаточной функции головы, по сравнению с другими стимулами. Для стимулов С1ну и № 119 отмечалось наибольшее количество случаев правильных опознаний и отсутствие переворотов направления движения по подсчетам в отдельных сериях опытов (таблица 2). При усреднении данных по обоим направлениям движения и двум сериям каждый из 10 испытуемых превысил порог опознания. Значения средней вероятности правильных ответов при оценке направления движения по всем 10 испытуемым для стимулов С1ну и № 119 составляли 90 ± 5% и 94 ± 3% соответственно. Распределения средних вероятностей правильных ответов при оценке направления движения этих двух стимулов между собой достоверно не различались.

Влияние динамических изменений общей мощности сигналов, используемых для имитации движения, на точность опознания направления движения продемонстрированы на рис. 3. Средняя вероятность опознания направления виртуального движения увеличивалась в следующей последовательности стимулов: стимул С1 с отсутствием изменений мощности; стимул Св с изменениями мощности, равными 1.4 дБ и обусловленными изменением ширины спектрального минимума; стимулы Сн и С1н с изменениями мощности 3.7 дБ, обусловленными изменением ширины спектрального максимума; стимул Снв с изменениями мощности 4.3 дБ, обусловленными изменением ширины спектрального минимума и максимума; стимул С1ну с изменениями мощности 6.8 дБ, обусловленными изменением ширины спектрального максимума и дополнительным изменением мощности его спектральных компонентов; стимул № 119, синтезированный на основе передаточных функций головы. Изменения общей мощности в этом стимуле составляли 7.4 дБ, и были обусловлены изменениями мощности в области максимума и минимума. Таким образом, точность опознания виртуального движения источника звука повышалась по мере увеличения динамических изменений общей мощ-

ности сигналов, используемых для имитации движения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе выполнена оценка различных стимулов, имитирующих движение источника звука в вертикальной плоскости в области максимальной чувствительности (координаты по элевации от −45° до 45°, по азимуту 0°). Для имитации движения источника звука был использован подход, который отличается от предложенных ранее тем, что основан не на усреднении [7] или масштабировании индивидуальных передаточных функций [5], а на выборе неиндивидуализированной передаточной функции, наиболее эффективной для локализации виртуального движения источника звука большинством слушателей, и на воспроизведении основных особенностей ее спектрального профиля. Предпосылкой для такого подхода явились результаты исследования, показавшего, что способность человека к локализации неподвижного источника звука на основе неиндивидуализированных передаточных функций хотя и снижается по сравнению с локализацией на основе собственных передаточных функций, но остается адекватной при условии, что неиндивидуализированные передаточные функции записаны у слушателя с хорошими локализационными способностями [8].

Данные настоящей работы подтвердили вывод, сделанный нами по результатам исследования восприятия направления виртуального движения слушателями 19–27 лет при его имитации на основе неиндивидуализированных передаточных функций: для локализации по вертикали используются не только изменения спектрального минимума (в области частот 5–12 кГц), но и спектрального максимума (в области частот 2.5–8 кГц) [10]. Это не означает, что локализация источника звука в вертикальной плоскости на основе смещения спектрального минимума невозможна. В настоящей работе трудности при определении направления движения стимула С1 на основе смещения спектрального минимума в широкополосном шуме испытывали слушатели в возрасте 57–73 лет при ширине минимума 1 кГц. По-видимому, ширина минимума 1 кГц близка к ширине слуховых фильтров на высоких частотах слуха человека. Это обосновывается еще и тем, что такая ширина минимума достаточна для того, чтобы более молодые слушатели в возрасте 19–37 лет могли опознавать направление ее смещения [10, 13], но недостаточна для того, чтобы слушатели этого возраста могли обнаруживать стационарный минимум в шуме с центральной частотой 8 кГц [13]. Отсутствие опознания виртуального движения на основе смещения спектрального минимума шириной 1 кГц у пожилых слушателей

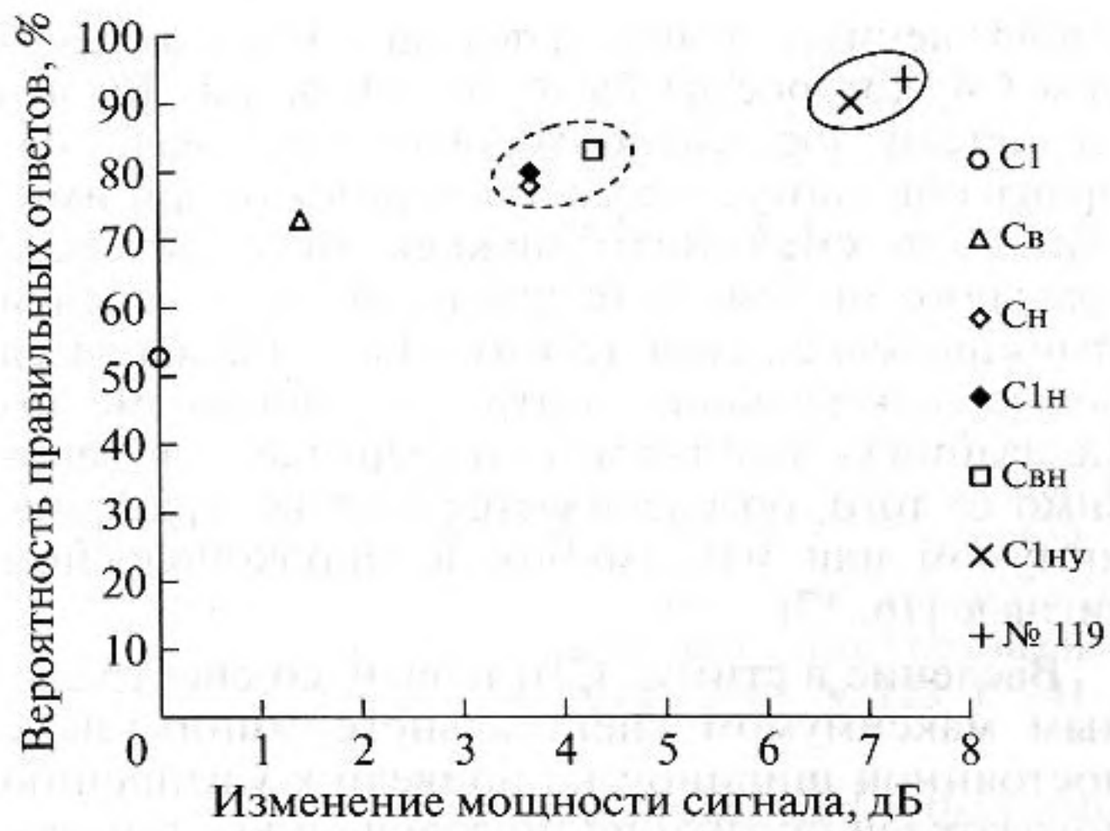

Рис. 3. Зависимость вероятности правильных ответов при оценке виртуального движения вверх и вниз от динамических изменений мощности сигналов, используемых при имитации движения.

По оси абсцисс – изменение мощности сигнала, дБ; по оси ординат – средняя вероятность правильных ответов при оценке направления движения, %. Пунктирной линией обведены результаты оценки стимулов, изменение мощности в которых связано только с изменением ширины спектральных максимумов, сплошной линией – результаты оценки стимулов, изменение мощности в которых связано с изменением ширины и мощности спектральных максимумов.

может быть связано с возрастным снижением частотного разрешения слуха [11, 14].

Большинство пожилых слушателей (7 из 10 человек) могли опознавать направление движения стимула Св, которое имитировалось спектральным минимумом с изменяющейся шириной. В этом случае при имитации движения вверх нижняя граница минимума смещалась в сторону высоких частот (от 6 до 12 кГц), верхняя граница (12.5 кГц) оставалась неизменной, и ширина минимума, таким образом, сужалась. Улучшение опознания стимула Св по сравнению со стимулом С1 могло быть связано с большей шириной минимума во всех отрезках шума, составляющих стимул Св, за исключением последнего отрезка. Если испытуемые при опознании направления движения опирались на смещение нижней границы минимума, то постепенное уменьшение его ширины могло ими не учитываться. Предположение о том, что подъем источника звука по вертикали отражается именно смещением нижней границы спектрального минимума, а не смещением его центральной частоты, высказывалось еще в ранних работах по определению роли спектральных признаков в локализации источника звука [15].

В стимуле Сн верхняя граница спектрального максимума перемещалась в диапазоне 4–8 кГц, более низкочастотном по сравнению со спектральной границей в стимуле Св. Это приводило

к повышению опознания по сравнению со стимулом Св, которое не было достоверным. То, что слушатели достаточно хорошо опознавали направление виртуального движения как при имитации его смещением нижней границы спектрального минимума (стимул Св), так и верхней границы максимума (стимул Сн), объясняется ролью спектрального контраста в механизме локализации источника звука по вертикали, независимо от того, обеспечивается этот контраст минимумом или максимумом в широкополосном сигнале [16, 17].

Введение в стимул С1н наряду со спектральным максимумом спектрального минимума с постоянной шириной не привело к улучшению показателей опознания по сравнению с показателями для стимула Сн, поскольку смещение спектрального минимума шириной 1 кГц для слушателей данной возрастной категории не было значимым. Использование одновременно спектральных максимума и минимума в стимуле Свн повысило показатели опознания направления движения по сравнению с показателями для стимулов Св, Сн и С1н, но это повышение не было достоверным. Вместе с тем, дополнительное усиление мощности спектральных компонентов в области максимума (2.5–8 кГц) привело к достоверному улучшению показателей опознания направления движения стимула С1ну по сравнению со стимулами Св и Сн. В результате показатели опознания движения стимула С1ну приблизились к показателям опознания движения стимула № 119, синтезированного на основе передаточных функций головы, который использовался в качестве базового при синтезе и оценке всех прочих сигналов. С одной стороны, это подтверждает важную роль динамических изменений мощности спектральных компонентов в области спектрального максимума для локализации источника звука по вертикали, а с другой стороны, аргументирует возможность создания сигналов, имитирующих движение источника звука по вертикали, на основе искусственно синтезированных спектральных признаков локализации.

Особенно важным показателем при оценке виртуального движения является отсутствие переворотов направления движения, которые могут быть связаны с ошибками в оценке начальной и конечной точек траектории движения, аналогично ошибкам при локализации неподвижных звуков ("up-down confusion") [8]. Появление ошибок такого рода объясняют врожденной неспособностью слушателей однозначно определять положение источника звука в некоторых точках пространства. Количество таких ошибок увеличивается при предъявлении стимулов, синтезированных на основе неиндивидуализированных передаточных функций головы, и в отсутствие вспомогательных факторов при звуковой локализации – реверберации звуков и зрительной обратной связи [8]. Можно полагать, что введение в стимул С1ну динамических изменений мощности в области спектрального максимума стало тем вспомогательным фактором, который позволил всем участвующим в исследовании испытуемым однозначно определять направление его движения.

Таким образом, мы смогли выявить спектральные компоненты, обеспечивающие возможность определения направления виртуального движения источника звука в вертикальной плоскости у слушателей пожилого возраста. Как показали результаты опознания сигналов, синтезированных на основе неиндивидуализированных передаточных функций головы, слушатели молодого возраста при локализации источника звука опираются на те же компоненты передаточных функций [10]. Однако значимость изменений мощности в области низких частот у пожилых слушателей, безусловно, повышается. Представляется, что полученные результаты могут быть использованы для выработки критериев при создании стимулов, имитирующих движение источника звука в вертикальной плоскости для слушателей разных возрастных групп с различным состоянием слуха. Такие звуковые стимулы могут использоваться при проведении нейрофизиологических исследований по проблеме механизмов локализации источника звука в вертикальной плоскости у человека, которые изучены недостаточно по сравнению с горизонтальной плоскостью. Кроме того, разработка стимулов для имитации движения источника звука имеет и прикладное значение – данные по оценке возможности человека к локализации движущихся источников звука в разных плоскостях пространства полезны для улучшения качества слуховых аппаратов и решения задач операторской деятельности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-04-48212).

Авторы выражают благодарность сотрудникам Калифорнийского Университета, США (Center for Image Processing and Integrated Computing – CIPIC laboratory, University of California, Davis) за предоставление банка передаточных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Middlebrooks J.C., Green D.M.* Sound localization by human listeners // Ann. Rev. Psychol. 1991. V. 42. P.135–159.
2. *Агеева М.Ю., Альтман А.Я.* Дифференциальные пороги по скорости при движении звукового образа в вертикальной плоскости // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 3. С. 337–348.
3. *Малинина Е.С.* Монауральные спектральные признаки локализации (природа возникновения и

нейрофизиологический анализ) // Сенсорные системы. 2004. Т. 18. № 1. С. 3–20.

4. *Shaw E.A.G.* External ear response and sound localization // Localization of sound: Theory and Applications / Ed. by R. Gatehouse. Groton, CT: Amphora, 1982. P. 30–41.
5. *Middlebrooks J.C.* Individual differences in external-ear transfer functions reduced by scaling in frequency // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 106. P. 1480–1492.
6. *Middlebrooks J.C.* Narrow-band sound localization related to external ear acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. 1992. V. 92. P. 2607–2624.
7. *Hofman P.M., Van Opstal A.J.* Bayesian reconstruction of sound localization cues from responses to random spectra // Biol. Cybern. 2002. V. 86. P. 305–316.
8. *Wenzel E.M., Arruda M., Kistler D.J., Wightman F.L.* Localization using nonindividualized head-related transfer functions // J. Acoust. Soc. Amer. 1993. V. 94. P. 111–123.
9. *Kulkarni A., Colburn H.S.* Role spectral detail in sound-source localization // Nature. 1998. V. 396. P. 747–749.
10. *Малинина Е.С., Андреева И.Г., Альтман Я.А.* Локализация виртуальных стимулов, движущихся в медианной плоскости, слушателями разного возраста // Журн. эволюц. биохимии и физиологии. 2009. Т. 45. № 2. С. 207–221.
11. *Patterson R.D., Nimmo-Smith I., Weber D.L., Milroy R.J.* The deterioration of hearing with age: frequency selectivity, critical ratio, audiogram, and speech threshold // J. Acoust. Soc. Am. 1982. V. 72. P. 1788–1803.
12. *Stelmachowicz P.G., Beauchaine K.A., Kalberer A., Kelly W.J., Jesteadt W.* High-frequency audiometry: test reliability and procedural consideration // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 85. № 2. P. 879–887.
13. *Moore B.C.J., Oldfield S.R., Dooley G.J.* Detection and discrimination of spectral peaks and notches at 1 and 8 kHz // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 85. P. 820–835.
14. *Alexander J.M., Lufti R.A.* Sample discrimination of frequency by hearing-impaired and normal hearing listeners // J. Acoust. Soc. Amer. 2008. V. 123. P. 241–253.
15. *Hebrank J., Wright D.* Spectral cues used in the localization of sound sources in the median plan // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. P. 1829–1834.
16. *Musicant A.D., Chan J.C.K., Hild J.E.* Direction-dependent spectral properties of cat external ear: New data and cross-species comparisons // J. Acoust. Soc. Amer. 1990. V. 87. P. 757–781.
17. *Малинина Е.С.* Роль торможения в спектральном локализационном механизме звуковых сигналов // Сенсорные системы. 2006. Т. 20. № 3. С. 216–228.