

УДК 534.79, 612.85

ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОГОВОЙ ГРОМКОСТИ ПЕРВОГО ИЛИ ПОСЛЕДНЕГО ИМПУЛЬСА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ У СЛУШАТЕЛЕЙ С НОРМАЛЬНЫМ СЛУХОМ И СЛУХОВЫМИ ПОТЕРЯМИ

© 2020 г. Л. К. Римская-Корсакова^{1,*}, Д. И. Нечаев²¹АО Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника 4, Россия²ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова
119071 Москва, Ленинский пр., 33, Россия

*E-mail: lkrk@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.2019 г.

После доработки 24.12.2019 г.

Принята к публикации 28.01.2020 г.

Получены зависимости порогов обнаружения громкости тестового импульса, который был первым или последним в последовательности других (помеховых) импульсов, от интервала между ними. Цель работы — изучение свойств временного разрешения и изменений громкости отдельных импульсов последовательности у слушателей с разной слуховой чувствительностью, поиск показателей временной обработки периодических звуков. Тестовый и 11 помеховых импульсов имели центральную частоту 4 кГц и ширину частотной полосы 240 Гц. Уровень помеховых импульсов составлял 80 дБ УЗД. Период следования импульсов T помехи был равен задержке тестового импульса относительно помехи и варьировался в диапазоне 20–150 мс. Временное разрешение громкости импульсов соответствовало минимальному периоду T_{min} , при котором слушатель мог услышать тестовый импульс. Изменение пороговой громкости импульсов оценивали по сдвигу порога обнаружения тестового импульса $dIso$ в последовательности с периодом T_{min} относительного порога обнаружения одиночного импульса. Показатели T_{min} и $dIso$ сопоставляли со слуховой чувствительностью слушателей, с показателями временной суммации тонов и последовательностей импульсов. В измерениях участвовали две группы слушателей: четыре слушателя с нормальным слухом и один — с потерями слуха ~20 дБ (первая группа), а также два слушателя с высокочастотными потерями слуха ~40 дБ (вторая группа). Если у слушателей двух групп временное разрешение и изменения громкости тестовых импульсов коррелировали со слуховой чувствительностью, то у слушателей первой группы те же свойства коррелировали со свойствами суммации последовательностей импульсов. В первой группе порог T_{min} в 25 мс был у слушателей с показателями суммации последовательностей, равными ~2 дБ, но возрастал до 50–80 мс у слушателей с показателями, равными ~6 дБ. Сдвиги $dIso$ достигали 14–28 дБ, если импульс следовал за помехой, и 10–23 дБ, если он опережал помеху. У слушателей второй группы пороги T_{min} были высокими ~80–150 мс, а сдвиги $dIso$ — низкими ~0–9 дБ. Показатели T_{min} и $dIso$ могли характеризовать временную обработку периодических звуков.

Ключевые слова: громкость, импульс, периодическая последовательность, маскировка, суммация

DOI: 10.31857/S0235009220020092

ВВЕДЕНИЕ

Слуховая временная обработка играет важную роль при восприятии речи. Чтобы распознать фразы, слова и слоги в разговорном сообщении, слушатели должны выделять короткие изменяющиеся во времени элементарные речевые единицы — фонемы. При нормальном ритме диктор произносит 9–14 фонем за секунду, что соответствует периоду следования фонем в 110–70 мс. При повышении темпа речи разборчивость речи может снижаться (Wingfield et al., 1985) за счет

ухудшения восприятия фонем в потоке других фонем (Miller et al., 1984). Снижение слуховой чувствительности слушателей не всегда ведет к снижению разборчивости (Fitzgibbons, Gordon-Salant, 2010; 2011).

Большинство согласных звуков, играющих ключевую роль в восприятии речи, имеют частотный диапазон 1–5 кГц, небольшие длительности (~10–150 мс) и малые уровни. Слушатели с нормальным слухом легко отличают по громкости короткие фонемы согласных от продолжитель-

ных фонем гласных. У слушателей с кохлеарными потерями диапазон уровней и различия громкостей таких фонем могут быть меньше, поэтому разборчивость речи может быть хуже.

В результате временной маскировки громкость звуков может меняться (Fastl, 1984, Fastl, Zwicker, 2007, Mapes-Riordan, Yost, 1999; Nieder et al. 2003; Arieh et al. 2005; Wagner, Scharf, 2006; Epstein, 2007). При повышении темпа речи маскировка громкости фонем может быть выше, а разборчивость речи хуже.

В данной работе в психофизическом эксперименте в интересах поиска показателей, характеризующих слуховую временную обработку звуков, в том числе речевых звуков, оценивали временное разрешение громкости и изменения пороговой громкости моделей фонем согласных звуков в потоке других фонем. При этом за модель тестовой фонемы согласного звука был принят высокочастотный узкополосный тональный импульс, предъявляемый до или после потока других импульсов (моделей маскирующих фонем).

Чтобы оценить громкость импульсного звука, его нужно сопоставить с эталонным звуком заданной громкости. В данной работе было решено оценить не громкость, а изменения громкости импульсного звука, используя парадигму временной маскировки. В такой парадигме слушатель сравнивает помеху и комплекс, включающий помеху и тестовый сигнал, и обнаруживает тестовый сигнал на основании его субъективных качеств, а также качеств, присущих помехе и звуковому комплексу. Помеху, состоящую из последовательности импульсов, характеризуют такие субъективные качества, как высота периодичности¹ и громкость, а также тембральные качества. Высоту периодичности определяет частота, которая обратно пропорциональна периоду следования помехи $f_0 = 1/T$. Тембральные качества помехи могут быть связаны с областью возбуждения базиллярной мембраны (БМ), соответствующей спектру помехи. За счет взаимодействия вызванных помеховыми импульсами откликов БМ область возбуждения может быть изрезана частотой в $1/T$.

Звуковой комплекс “импульсная помеха – тестовый импульс”, вместе с уже перечисленными субъективными качествами помехи, имеет дополнительные качества. Слушатель способен обнаружить тестовый импульс на основании: его громкости; его задержки относительно остальных

импульсов; различий спектрально-временных качеств помехи и тестового импульса; различий длительностей помехи и комплекса. Чтобы избежать появления дополнительных качеств, задержку D между тестовым импульсом и помехой нужно установить равной периоду следования импульсов помехи T (т.е. $T = D$), а значения T выбрать в соответствии с темпами речевых сообщений. Частотно-временные параметры тестовых и помеховых импульсов нужно выбрать одинаковыми, а их частотные полосы ограничить шириной одной критической полосы слуха. Число импульсов помехи следует задать большим, чтобы длительности помехи и комплекса были субъективно одинаковыми. При таких условиях основой обнаружения отдельных импульсов в последовательности других импульсов может быть только громкость. Меняя период следования T , можно определить пороги обнаружения импульсов, а по ним судить о свойствах временного разрешения и маскировки громкости тестовых импульсов, предъявляемых в потоке других импульсов. Если расположить тестовый импульс в начале или конце последовательности, то можно разделить вклады эффектов обратной и прямой маскировок во временном разрешении громкости и маскировке громкости тестовых импульсов.

В данной работе в указанных выше условиях стимуляции оценивали влияние периода следования импульсов последовательности T на обнаружение громкости тестового импульса, который был первым или последним.

Цель работы – поиск общих и индивидуальных закономерностей временного разрешения и изменений громкости тестовых импульсов последовательностей у слушателей с разной слуховой чувствительностью, а также поиск показателей, характеризующих слуховую временную обработку ритмичных звуков, в том числе звуков речи. В формировании громкости звуков участвуют процессы временной суммации. Поэтому для определения причин, влияющих на временное разрешение и изменения громкости тестовых импульсов, показатели обнаружения громкости тестовых импульсов сопоставляли со слуховой чувствительностью слушателей, с показателями пороговой временной суммации тонов и последовательностей импульсов.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения порогов обнаружения импульсов проводили в звукозаглушающей камере. Использовали аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий генерацию звуков, управление экспериментом и протоколирование данных (Римская-Корсакова, 2007; 2011).

¹ Ощущение высоты звука может быть вызвано как возбуждением локальных областей базиллярной мембраны, так и временным распределением возбуждения центральных слуховых нейронов. Считается (Gelfand 2010; Moore, 1997), что центральные процессы отвечают за формирование высоты периодического узкополосного звука. Эту высоту называют высотой периодичности.

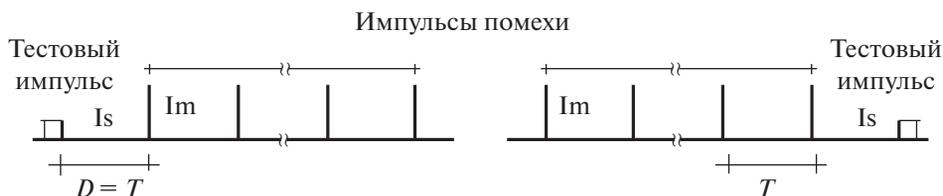


Рис. 1. Положение тестового импульса относительно помехи. Тестовый стимул мог быть либо в начале (слева), либо в конце (справа) последовательности. I_m и I_s – уровни помехового и тестового импульса. T – период следования импульсов помехи. D – задержка между тестовым импульсом и импульсами помехи.

Во всех измерениях испытательная последовательность имела два звуковых отрезка, разделенных паузой в 500 мс. Один отрезок содержал положительный стимул (комплекс помеха и тестовый сигнал), другой – отрицательный (только помеха). Звуковые отрезки формировались по ходу ведения экспериментов цифровым способом в виде файлов и проигрывались в случайном порядке. Для проигрывания файлов использовали звуковой адаптер E-MU 0204|USB с частотой дискретизации 44.1 кГц. Для фиксации реакции слушателя использовали клавиатуру компьютера. Путем нажатия на клавиши клавиатуры слушатель сообщал, в каком из двух отрезков находился положительный стимул. Испытательная последовательность поступала на правое ухо слушателя через головные телефоны Shennheiser HD-265.

ТЕСТОВЫЕ И ПОМЕХОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ

Схематичное изображение положительных стимулов представлено на рис. 1. Тестовые и помеховые импульсы имели сходные характеристики. Их огибающие имели форму гауссовой функции и синусоидальное заполнение с частотой 4 кГц. Ширина частотной полосы импульсов на уровне 0.7 была равна 240 Гц. В одной из серий использовали тестовые и помеховые импульсы с частотой 1 кГц и полосой 120 Гц.

Чтобы определить уровень тестовых импульсов I_s и импульсов помех I_m , пиковую амплитуду импульсов сопоставляли с амплитудой непрерывного тона, выраженной уровнем звукового давления (УЗД) в дБ относительно порога слышимости тона с частотой 1 кГц и давлением 20 мкПа. Для определения УЗД был использован шумомер Robotron 0024.

Уровень импульсов помехи составлял 80 дБ УЗД. Период следования импульсов помехи T и задержка тестового импульса относительно импульсов помехи D были равны друг другу $T = D$. Период T был равен 20, 25, 30, 40, 50, 80, 110, 120 или 150 мс.

Число импульсов помехи n_n выбирали так, чтобы две последовательности, содержащие n (поме-

ха) и $(n + 1)$ (помеха и тестовый сигнал), были не различимы по длительности.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ИМПУЛЬСОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В предварительной серии измерений определяли число импульсов n_n , при котором две последовательности, содержащие n и $(n + 1)$ импульс, нельзя различить по длительности. Был использован адаптивный двухинтервальный двухальтернативный метод вынужденного выбора. Отрицательным стимулом была последовательность импульсов помехи, содержащая n импульсов, а положительным – $(n + 1)$ импульс. В начале измерений значение n было равно единице. Слушатель легко определял более длинную последовательность. После двух правильных ответов число n увеличивалось на единицу, после одного неправильного – число n уменьшалось на единицу. Моменты перехода от уменьшения к увеличению или от увеличения к уменьшению числа импульсов помехи соответствовали точкам реверсии. За пороговое значение n_n принимали среднее значение числа импульсов, определенное по последним восьми из одиннадцати точек реверсии. Проводили четыре измерения, за порог n_n принимали медиану. Полученный таким образом порог n_n соответствует таковому, определенному по психометрической кривой на уровне 71% правильного обнаружения более длинной последовательности. Если число импульсов помехи n превышало n_n , то слушатель не различал длительности двух последовательностей, содержащих n и $(n + 1)$ импульсов.

ПСИХОМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ И ВЫЧИСЛЯЕМЫЕ ПО НИМ ПОКАЗАТЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для получения психометрических кривых использовали метод постоянных стимулов. Импульс предъявляли в тишине до или после импульсной помехи. Слушателю предъявляли два отрезка, один из которых содержал помеху, а другой – тестовый импульс и помеху. Слушатель

Таблица 1. Сведения о слушателях

Слушатель	Возраст, лет	Пол	Порог обнаружения импульса <i>Thpul</i> , дБ	Опыт участия в экспериментах, * музыкант-любитель
I	II	III	IV	V
C1	35	М	17	>60 ч *
C2	63	Ж	26	>60 ч
C3	58	Ж	59	>60 ч
C4	75	Ж	59	>60 ч
C5	35	М	16	~3 ч*
C6	25	Ж	10	>20 ч
C7	35	М	15	~20 ч*

Номера столбцов отмечены римскими цифрами.

должен был обнаружить присутствие тестового стимула. Тестовые импульсы с разными уровнями предъявляли по 10 раз. Уровни чередовали случайным образом. По результатам измерений получали зависимость вероятности правильного обнаружения тестового импульса от его уровня. За порог обнаружения импульса принимали уровень, соответствующий 75%.

Психометрические кривые получали при разных интервалах T и определяли минимальный период следования импульсов помехи T_{min} , начиная с которого слушатель мог обнаружить тестовый импульс. При периодах T определяли сдвиги порогов dI_{50} . Они были равны разности между порогом обнаружения импульсов в присутствии помехи и в тишине. Мы полагали, что при выбранных параметрах стимуляции слушатель обнаруживал тестовый импульс на основании его громкости, поэтому период T_{min} определял временное разрешение громкости тестового импульса, а сдвиг порога dI_{50} при T_{min} – изменение громкости импульса на пороге временного разрешения.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ СУММАЦИИ ТОНОВ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСОВ

Пороговую временную суммацию оценивали по зависимости порогов обнаружения тональных посылок или последовательностей импульсов от их длительности.

Тональные посылки частотой 4 кГц имели длительности 15, 30, 60, 120, 240, 300, 500 и 800 мс. Интервалы между импульсами последовательностей T были равны 20, 30, 50 или 80 мс. Последовательности состояли из 11 импульсов, т.е. их длительности составляли 200, 300, 500 и 800 мс.

Для определения таких порогов использовали адаптивный метод. Положительным стимулом были тональная посылка или последовательность

импульсов. Уровень положительного стимула в начале измерений был заведомо выше порога. Слушатель сообщал об обнаружении положительного стимула путем нажатия на соответствующую клавишу клавиатуры компьютера. После двух правильных ответов уровень положительного стимула уменьшали на 30%, а после одного неправильного ответа – увеличивали на 30%. Моменты перехода от уменьшения к увеличению или, наоборот, от увеличения к уменьшению уровней называли точками реверсии. За порог принимали среднее значение уровня положительного стимула, вычисленного по последним восьми из одиннадцати точек реверсии. Полученный таким образом порог соответствовал таковому, определенному по психометрической кривой на уровне 71% правильного обнаружения тестового импульса. Порог измеряли 4 раза, за порог принимали медиану. Если ошибка среднего значения превышала 2 дБ, то проводили еще два измерения. За порог принимали медиану, вычисленную на основании шести измерений порогов.

СЛУШАТЕЛИ

Таблица 1 содержит информацию о слушателях, принявших участие в измерениях. Указан порог обнаружения тестовых импульсов с центральной частотой 4 кГц, шириной полосы 240 Гц в тишине, возраст, пол, опыт участия в слуховых измерениях в часах, предшествующих данному исследованию. В соответствии со слуховой чувствительностью слушатели были разделены на две группы. В первую группу вошли пять слушателей C1, C6, C7, C5 и C2 (чувствительность от 10 до 26 дБ). Во вторую группу вошли слушатели C3 и C4, у которых пороги обнаружения одиночных импульсов были почти на 40 дБ хуже.

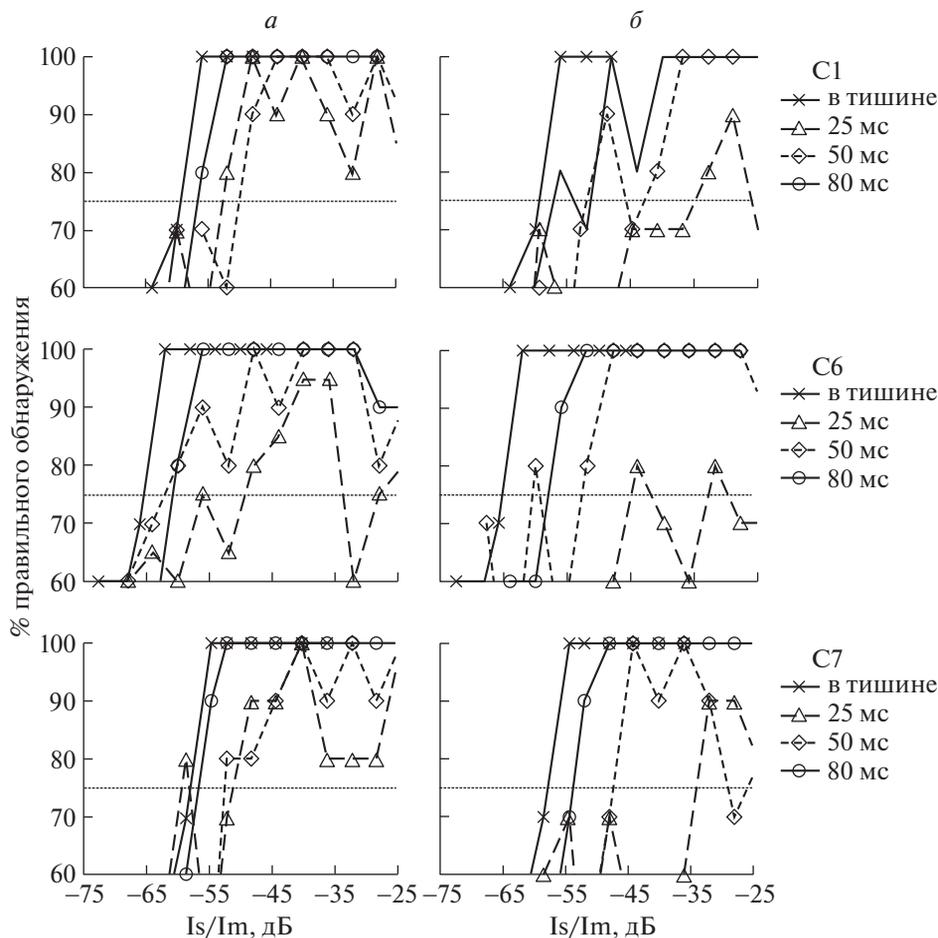


Рис. 2. Психометрические кривые или зависимости вероятности правильного обнаружения тестового импульса, предъявляемого в тишине, до и после последовательности импульсов помехи от уровня тестового импульса у трех слушателей первой группы С1, С6 и С7.

a – тестовый импульс опережал помеху; *б* – тестовый импульс следовал за помехой. По оси абсцисс – отношение уровней тестового I_s и помехового I_m импульсов; по оси ординат – вероятность ответа в %; легенда – слушатель и интервал между импульсами помехи T . Горизонтальный пунктир отмечает вероятность ответа в 75%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение числа импульсов в последовательности

Перед основной серией измерений для каждого слушателя определяли то число импульсов помехи n_n , когда две последовательности, содержащие n и $(n + 1)$ импульс, были не различимы по длительности. У разных слушателей число импульсов n_n варьировало от 4 до 11 при периодах следования импульсов последовательностей в диапазоне 20–110 мс. В дальнейших измерениях для всех слушателей число n_n было установлено равным 11.

Обнаружение тестовых импульсов

Психометрические кривые двух групп слушателей или зависимости вероятности правильного обнаружения тестового импульса, предъявляемого в тишине, до и после последовательностей по-

меховых импульсов, от уровня тестового импульса, представлены на рис. 2–4. По этим кривым при разных интервалах между импульсами помехи T были определены сдвиги порогов dI_{50} как разности между порогом обнаружения импульсов в присутствии помехи и в тишине (табл. 2). Мы полагали, что сдвиги порогов dI_{50} указывают на изменения громкости тестовых импульсов под действием периодической помехи с интервалом T .

Сначала у слушателей первой группы (табл. 2) мы оценили достоверность изменений громкости тестовых импульсов dI_{50} при изменении интервала T между импульсами помехи. Для этого сопоставили значения сдвигов dI_{50} при T в 50 и 80 мс (за исключением отсутствующих данных слушателя С5 при предъявлении тестового импульса, опережающего помеху). В соответствии с критерием Манна–Уитни изменения dI_{50} при изменении T были достоверны: $p = 0.03$, если тестовый

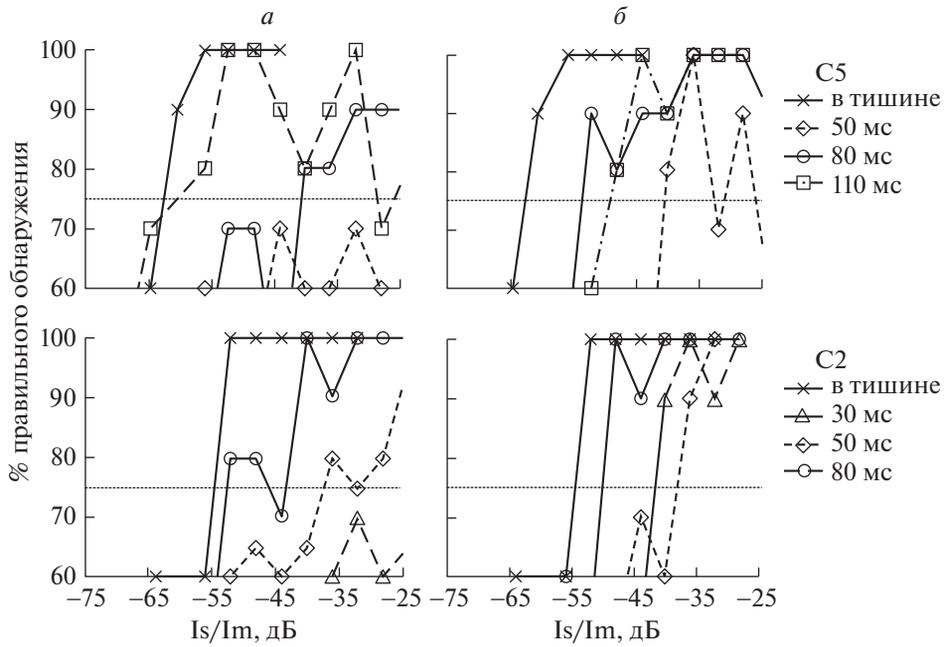


Рис. 3. Психометрические кривые, полученные у слушателей первой группы C5 и C2. Остальное – то же, что на рис. 2.

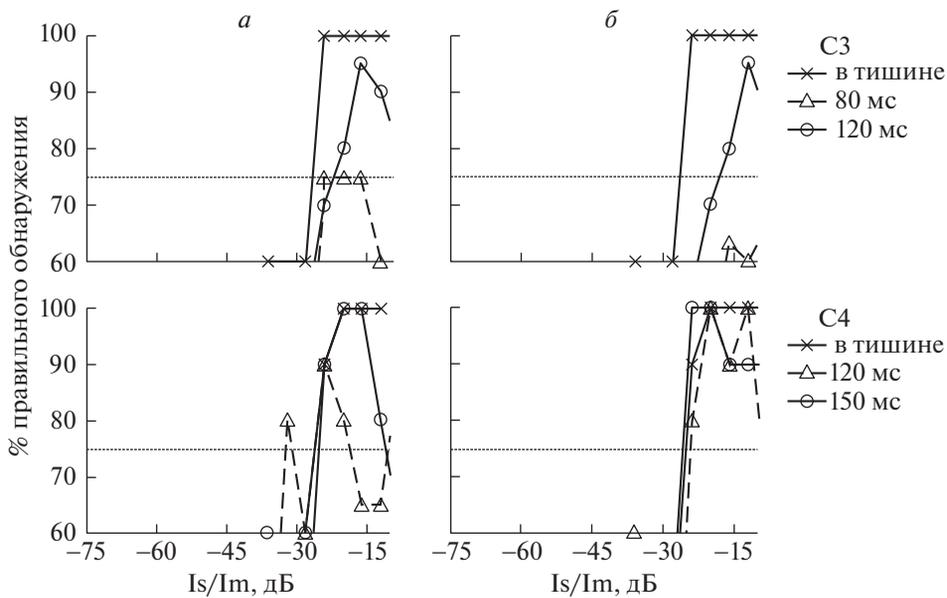


Рис. 4. Психометрические кривые двух слушателей второй группы, C3 и C4, со значительными потерями слуха на частоте 4 кГц. Остальное – то же, что на рис. 2.

импульс опережал помеху и $p = 0.0079$, если тестовый импульс следовал за помехой.

За пороги временного разрешения T_{min} были приняты минимальные интервалы T , при которых слушатели могли обнаружить тестовый импульс. Сдвиги порогов обнаружения на пороге временного разрешения dI_{50} при T_{min} указывали на максимально возможные изменения громко-

сти тестовых импульсов. Пороги T_{min} и dI_{50} при T_{min} отмечены жирным шрифтом в табл. 2.

У слушателей первой группы C1, C6 и C7 пороги T_{min} составили 25 мс при любых положениях тестового импульса относительно помехи. У слушателей C5 и C2 пороги T_{min} были больше, т.е. 80 и 50 мс, если импульс опережал помеху, и 50 и 30 мс, если импульс следовал за помехой.

Таблица 2. Сдвиги порогов обнаружения $dIso$ при разных периодах следования помеховых импульсов T , определенные по психометрическим кривым. Пороги временного разрешения тестового импульса $Tmin$ и соответствующие им сдвиги порогов обнаружения $dIso$ при $Tmin$ выделены жирным шрифтом

Слушатель	Импульс перед помехой		Импульс после помехи	
	T , мс	$dIso$, дБ	T , мс	$dIso$, дБ
I	II	III	IV	V
	Слушатели первой группы			
C1	25	12	25	26
	50	10	50	12
	80	4	80	4
C6	25	10	25	28
	50	10	50	10
	80	2	80	2
C7	25	11	25	24
	50	12	50	9
	80	4	80	4
C2	30	*	30	14
	50	17	50	16
	80	2	80	6
C5	50	*	50	23
	80	23	80	8
	110	2	110	14
	Слушатели второй группы			
C3	80	2	80	*
	120	3	120	9
C4	120	**	120	0
	150	0	150	0

* – тестовый импульс не обнаружен,

** – порог не определен из-за большого разброса данных.

Номера столбцов отмечены римскими цифрами.

Величина максимального снижения громкости $dIso$ при $Tmin$ по-разному соотносилась с величиной $Tmin$ при разных положениях тестовых импульсов относительно помехи. Если импульс опережал помеху, то максимальное снижение громкости или $dIso$ при $Tmin$ в 17–23 дБ наблюдали у слушателей с более высокими порогами $Tmin$ в 50–80 мс (C2, C5). Если импульс следовал за помехой, то максимальное снижение громкости в 24–28 дБ наблюдали у слушателей с более низкими порогами $Tmin$ в 25 мс (C1, C6, C7).

Данные слушателей второй группы также представлены в табл. 2. Отметим, что обнаружение тестовых импульсов для слушателей второй группы было намного более сложной задачей, чем для слушателей первой группы. Слушатели C3 и C4 с трудом обнаруживали тестовые импульсы как на стадии обучения, так и в основной серии измерений. Эти трудности проявились в по-

вышении разброса правильных ответов у слушателей второй группы, по сравнению с первой.

При сходной слуховой чувствительности слушателей C3 и C4 пороги временного разрешения $Tmin$ и сдвиги порогов $dIso$ при $Tmin$ были разными (табл. 2). Пороги $Tmin$ были выше у слушателя C4 (150 мс, если импульс опережал помеху, и 120 мс, если импульс следовал за помехой), чем у слушателя C3 (80 мс, если импульс опережал помеху и 120 мс, если импульс следовал за помехой). Однако сдвиги порогов $dIso$ были ниже у слушателя C4 (0 дБ при любых положениях тестового импульса относительно помехи), чем у слушателя C3 (2 дБ, если импульс опережал помеху и 9 дБ, если импульс следовал за помехой). Нулевое значение $dIso$ указывало на отсутствие эффекта снижения громкости импульса при маскировке.

Попробуем найти такие свойства слуха, которые могли влиять на временное разрешение $Tmin$ и изменения громкости тестовых импульсов $dIso$

Таблица 3. Показатели временной суммации тонов и последовательностей импульсов

Слушатели	Длительность тона, мс				Период следования импульсов последовательности, мс			
	15	30	60	120	20	30	50	80
	Показатель суммации P_{ton} , дБ				Показатель суммации P_{seq} , дБ			
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Слушатели первой группы								
C1	13.3	8.2	5.5	2.1	3.1	4.7	2.0	0.2
C6	10.6	7.7	4.6	0.9	-0.2	0.0	1.0	-1.0
C7	10.1	6.3	4.6	1.7	-0.4	0.9	-2.0	-1.0
C5	10.9	8.0	5.0	3.0	9.5	9.1	6.9	4.9
C2	7.4	5.9	2.6	0.7	7.7	6.4	8.5	7.9
Слушатели второй группы								
C3	5.1	1.1	0.6	0.1	-3.0	0.3	-	0.9
C4	4.4	1.9	-0.1	1.1	1.5	0.9	0.7	-0.6

Номера столбцов отмечены римскими цифрами.

при T_{min} у слушателей двух групп и у слушателей первой группы.

Формирование громкости звуков и временное разрешение могут быть под влиянием слуховой чувствительности, свойств временной суммации тонов и последовательностей импульсов. Слуховую чувствительность характеризовали пороги обнаружения одиночных импульсов (показатели $Thpul$) (табл. 1), а свойства слуховой суммации были оценены в дополнительных экспериментах, данные которых представлены в табл. 3.

Суммацию тонов мы оценили по разности между порогами обнаружения тонов с длительностями 15, 30, 60, 120 мс и длительностью в 240 мс. У всех слушателей суммация тонов была максимальной при длительностях в 15 мс, и спадала до нуля при длительностях тонов примерно в 240 мс у слушателей первой группы и при длительностях тонов примерно в 60–120 мс у слушателей второй группы. Суммация у слушателей первой группы была больше, чем у слушателей второй группы.

Суммацию последовательностей импульсов оценивали по разности между порогами обнаружения одиночного импульса и последовательностей импульсов с периодом следования T . У всех слушателей свойства суммации последовательностей были несколько разными. При увеличении периода следования T суммация варьировала в пределах 2 дБ у слушателей С6 и С7; увеличивалась на 3 дБ у слушателя С1 и увеличивалась на 6–8 дБ у слушателей С5 и С2. Суммация последовательностей случайно варьировала в пределах 4 дБ у слушателя С3, но плавно снижалась примерно на 2 дБ у слушателя С4. Свойства суммации последовательностей импульсов явно не соответствовали свойствам суммации тонов (табл. 3).

Для объяснения особенностей показателей обнаружения T_{min} и $dIso$ при T_{min} эти показатели мы сравнивали со слуховой чувствительностью (показатели $Thpul$), со свойствами временной суммации тонов (показатели P_{ton}) и последовательностей импульсов (показатели P_{seq}). За показатели P_{ton} принимали разности между порогами обнаружения одиночного импульса и последовательностями импульсов с периодом следования T в 15 мс, а за показатели P_{seq} – разности между порогами обнаружения одиночного импульса и последовательностями импульсов с периодом следования T в 20 мс (табл. 3).

Для слушателей двух групп корреляционные связи между показателями $Thpul$, P_{ton} , P_{seq} и показателями T_{min} , $dIso$ при T_{min} представлены в табл. 4. Вариации слуховой чувствительности слушателей двух групп были более 40 дБ. На фоне такой вариации сильная и достоверная ($p > 0.9$) корреляционная связь между порогами T_{min} и показателями $Thpul$ имела место при любых положениях тестового импульса относительно помехи: R был равен 0.86, если тестовый импульс опережал помеху, и R был равен 0.9, если импульс следовал за помехой. Показатель $dIso$ при T_{min} достоверно возрастал ($R = -0.94$, $p > 0.9$) при понижении показателя $Thpul$, но только если тестовый импульс следовал за помехой. Достоверная сильная корреляционная связь также имела место между показателем P_{ton} и показателем обнаружения $dIso$ при T_{min} , если тестовый импульс следовал за помехой (табл. 3). Данная корреляционная связь, вероятно, была следствием закономерных изменений показателей суммации тонов при изменениях слуховой чувствительности. Показатели суммации последовательностей импульсов

Таблица 4. Полученные по данным слушателей двух групп значения коэффициентов корреляции R между показателями слуховой чувствительности $Thpul$, суммации тонов $Pton$, суммации последовательностей импульсов $Pseq$ и показателями обнаружения $Tmin$ и $dIso$ при $Tmin$. Статистически значимые значения R выделены **жирным** шрифтом

Показатели	Импульс перед помехой		Импульс после помехи	
	$Tmin$: табл. 2, II	$dIso$: табл. 2, III	$Tmin$: табл. 2, IV	$dIso$: табл. 2, V
$Thpul$: табл. 1, IV	0.86	-0.76	0.90	-0.94
$Pton$: табл. 3, II	-0.78	0.64	-0.82	0.93
$Pseq$: табл. 3, VI	-0.20	0.82	-0.11	0.15

Римскими цифрами отмечены строки табл. 1–3, из которых были взяты данные.

Таблица 5. Полученные по данным слушателей первой группы значения коэффициентов корреляции R между показателями слуховой чувствительности $Thpul$, суммации тонов $Pton$, суммации последовательностей импульсов $Pseq$ и показателями обнаружения $Tmin$ и $dIso$ при $Tmin$. Статистически значимые значения R выделены **жирным** шрифтом

Показатели	Импульс перед помехой		Импульс после помехи	
	$Tmin$: табл. 2, II	$dIso$: табл. 2, III	$Tmin$: табл. 2, IV	$dIso$: табл. 2, V
$Thpul$: табл. 1, IV	0.10	0.42	0.33	-0.94
$Pton$: табл. 3, II	-0.05	-0.23	-0.25	0.80
$Pseq$: табл. 3, VI	0.81	0.95	0.91	-0.63

Римскими цифрами отмечены строки табл. 1–3, из которых были взяты данные.

сов $Pseq$ не обнаружили значимых связей с показателями обнаружения $Tmin$ и $dIso$ при $Tmin$ при любых положениях тестовых импульсов относительно помехи, что могло быть результатом отсутствия сходных изменений показателей $Pseq$ и $Thpul$ (табл. 3).

В табл. 5 указаны связи между показателями $Thpul$, $Pton$, $Pseq$ и показателями $Tmin$ и $dIso$ при $Tmin$ у слушателей первой группы. Различия слуховой чувствительности у слушателей первой группы (~20 дБ) были меньше, чем в группе слушателей двух групп (>40 дБ), поэтому корреляционные связи между показателями были другими.

Коэффициент R указывал на весьма сильную ($|R| > 0.91$) и достоверную ($p > 0.95$) связь между показателями $Thpul$ и показателями $dIso$ при $Tmin$ только при следовании тестовых импульсов за помехами (т.е. меньше порог $Thpul$, больше сдвиг $dIso$ при $Tmin$). Сильные и достоверные корреляционные связи были обнаружены между показателем суммации последовательности $Pseq$ и показателем обнаружения $dIso$ при $Tmin$, когда тестовый импульс опережал помеху ($R = 0.95$), а также между $Pseq$ и $Tmin$, когда импульс следовал за помехой ($R = 0.9$). Показатели суммации тонов $Pton$ не коррелировали с показателями обнаружения $Tmin$ и $dIso$ при $Tmin$.

На основании проведенных исследований можно заключить следующее.

– Корреляционные связи между данными у слушателей двух групп (табл. 4) указывали, что временное разрешение громкости тестового импульса при любых его положениях относительно помехи могло зависеть от слуховой чувствительности, если вариации последней у слушателей были >40 дБ (т.е. чем выше чувствительность, тем лучше разрешение громкости). Слуховая чувствительность также влияла на величину изменения громкости, но при условии, что тестовый импульс следовал за помехой (чем выше чувствительность, тем больше изменения громкости). Временная суммация последовательностей импульсов не имела влияния на показатели $Tmin$ и $dIso$.

– Данные слушателей первой группы (табл. 5) указывали, что незначительные вариации слуховой чувствительности (<20 дБ) не приводили к достоверным изменениям временного разрешения тестовых импульсов при любых его положениях относительно помехи. Однако при следовании тестового импульса за помехой величина максимального снижения громкости импульса была чувствительной к небольшим вариациям слуховой чувствительности (т.е. чем ниже порог обнаружения, тем больше изменения громкости). Свойства суммации последовательностей импульсов достоверно коррелировали со свойствами временного разрешения тестового импульса, когда он следовал за помехой, и изменениями

громкости тестового импульса, когда он опережал помеху.

– Число достоверных корреляционных связей было больше, если тестовый импульс следовал за помехой (табл. 4 и 5). Кроме этого, у слушателей первой группы (табл. 2) величина максимального снижения громкости d_{Iso} неодинаково соотносилась с временным разрешением T_{min} при разных положениях тестовых импульсов относительно помехи. Если импульс опережал помеху, то максимальное снижение громкости регистрировали у слушателей с худшим временным разрешением, а если импульс следовал за помехой, то максимальное снижение громкости было больше у слушателей с лучшим временным разрешением. Все это указывало, что положение тестового импульса, по-разному, влияло на временное разрешение и изменения его громкости. Процессы суммации вовлечены в формирование громкости импульсов, вероятно, независимо от положения последних. При следовании тестовых импульсов за помехой, наряду с суммацией, могла участвовать слуховая адаптация. Кумулятивное действие адаптации, суммации, а также слуховой чувствительности, могло быть причиной указанных выше различий, групповых и индивидуальных данных.

ОБСУЖДЕНИЕ

У слушателей с разной слуховой чувствительностью мы оценивали временное разрешение и изменения громкости тестовых импульсов на основании порогов их обнаружения. Сопоставим полученные результаты с известными данными.

Временное разрешение. Существуют разные подходы к оценке временного разрешения. Наиболее близким к данному исследованию подходом является обнаружение изменений амплитуд звуков с разными скоростями этих изменений. Зависимость порогов обнаружения амплитудной модуляции тонального или шумового сигнала от частоты модуляции называют временной модуляционной передаточной функцией (temporal modulation transfer function – TMTF) (Viemeister, 1979).

Показано, что у слушателей с нормальным слухом пороги обнаружения амплитудной модуляции широкополосного шума не зависели от частоты модуляции, если она была меньше 30–50 Гц (Bacon, Viemeister, 1985; Bacon, Gleitman, 1992). Полагали, что при низких частотах слуховая система анализировала амплитудные изменения звуков. При частотах модуляций выше 30–50 Гц обнаружение модуляций было под влиянием свойств слуховой временной обработки, поэтому чувствительность к модуляциям падала с ростом частоты. Форма TMTF мало зависела от уровня шумового сигнала, однако, при самых низких

уровнях шума обнаружение модуляций было наихудшим.

Слушатели с заметными ухудшениями слуха, как правило, менее чувствительны к надпороговым амплитудным модуляциям, чем обычные слушатели (Formby, 1987; Bacon, Viemeister, 1985; Bacon, Gleitman, 1992; Moore et al., 1992). Представленные данные о временном разрешении громкости тестовых импульсов, следующих за импульсными помехами, вполне соответствуют известным данным. У наших слушателей со значительными слуховыми потерями по сравнению с нормально-слышающими временное разрешение громкости было достоверно хуже.

При этом наши данные показали, что при рассмотрении двух групп сила и значимость корреляционных связей между слуховой чувствительностью и временным разрешением громкости тестового импульса зависели от его положения в последовательности. Временная суммация могла участвовать в формировании громкости тестовых импульсов при его разных положениях относительно помехи. Однако при формировании громкости следующих за помехами тестовых импульсов, наряду с суммацией, могла принимать участие кратковременная адаптация, обусловленная изменениями возбудимости слуховых нейронов. У животных выявлено влияние возрастного изменения слуха на возбудимость слуховых нейронов (McFadden et al., 1997; Mills et al., 2004). Так, в работе (Schmiedt et al., 2002) сравнили зависимости амплитуд вызванных потенциалов от интенсивности тональных импульсов (динамические характеристики), полученные у нормальных и пожилых песчанок методом регистрации суммарных электрических ответов волокон слухового нерва. По сравнению с молодыми особями у пожилых песчанок наблюдали заметные сдвиги порогов обнаружения потенциалов (ухудшение слуховой чувствительности), значительное снижение максимальных амплитуд таких потенциалов и уменьшение наклонов динамических характеристик. Эти данные показывают, что причиной появления зависимости временного разрешения (измеренного по порогам обнаружения модуляций продолжительных звуков или порогам обнаружения громкости тестовых импульсов в последовательности) от слуховой чувствительности слушателей, вполне могли быть возрастные изменения свойств слуховой кратковременной адаптации.

Временная суммация тонов. Согласно известным данным (Garner, Miller, 1947; Green et al., 1957; Plomp, Bouman, 1959; Zwillocki, 1960; 1969), пороги обнаружения тонов у слушателей с нормальным слухом снижаются примерно на 3 дБ при удвоении длительностей тонов. Это происходит при длительностях тонов, меньших ~300 мс. Таковую суммацию называют энергетической и по-

лагают, что она способствует выделению полезных звуков на фоне помех. У слушателей с пониженной слуховой чувствительностью пороги обнаружения тонов снижаются менее, чем на 3 дБ при удвоении длительности (Elliott, 1975; Florentine et al., 1988).

Свойства суммации тонов наших слушателей соответствовали известным данным. Временная суммация у слушателей С2, С3 и С4 с потерями слуха разной степени отсутствовала или была меньше, чем у слушателей С1, С6, С7 и С5 с нормальным слухом.

Для случая тестовых импульсов, следующих за помехой, у слушателей двух групп было обнаружено, что показатель суммации тонов P_{ton} коррелировал со сдвигами порогов $dIso$ при T_{min} (обнаруживающих изменения громкости). У слушателей первой группы, имеющих небольшие различия слуховой чувствительности и поэтому небольшие различия процессов адаптации, корреляционные связи между P_{ton} и $dIso$ при T_{min} были слабыми и незначимыми. Это также поддерживает предположение, что не столько энергетическая суммация тонов, сколько изменения слуховой адаптации, были причиной изменений громкости тестовых импульсов на пороге временного разрешения $dIso$ при T_{min} .

Временную суммацию последовательностей импульсов оценивает зависимость порога обнаружения последовательности импульсов от интервала T между ними. У слушателей с нормальным слухом пороги обнаружения последовательностей равновеликих импульсов снижались на 2–3 дБ при уменьшении периода следования от 100 до 30 мс (Garner, 1947). В другой работе (Carlyon et al., 1990) показано, что при увеличении периода следования импульсов в последовательности от 20 до 80 мс средние показатели суммации менялись в пределах 2 дБ у слушателей с нормальным слухом, но оставались примерно постоянными у слушателей со слуховыми потерями. Это значит, что суммация последовательностей была неэнергетической у слушателей с нормальным слухом или отсутствовала вовсе у слушателей со слуховыми потерями.

По причине небольшого числа слушателей мы не могли оценить средние показатели суммации последовательностей импульсов, но могли учесть индивидуальные отличия показателей суммации слушателей и выявить их возможную роль в обнаружении тестовых импульсов.

У слушателей С5 и С2 из первой группы показатель суммации последовательностей оказался больше, чем у остальных слушателей данной группы. Возможно, за счет суммации слушатели С5 и С2 имели заметное преимущество в обнаружении последовательностей импульсов по сравнению с обнаружением одиночных импульсов.

Скорее всего, по той же причине временное разрешение громкости импульсов T_{min} в последовательности у них было хуже, чем у других слушательской первой группы.

Изменения громкости тестовых импульсов, которые опережали шумовые помехи, были обнаружены давно (Fastl, 1984; Fastl, Zwicker, 2007). Этот слуховой эффект был назван “частичной маскировкой громкости” (Scharf, 1964; Richards 1977), его объясняли незавершенностью процесса суммации реакции, вызванной тестовым звуком, в момент появления реакции на помеху. Наши данные не противоречат этой гипотезе. Мы обнаружили у слушателей первой группы связь между индивидуальными показателями суммации последовательностей импульсов P_{seq} и показателем обнаружения, выявляющим изменения громкости тестового импульса на пороге временного разрешения $dIso$ при T_{min} . Чем были больше у слушателей показатели суммации последовательностей импульсов P_{seq} , тем были больше изменения громкости тестовых импульсов.

Известен также слуховой эффект изменений громкости тестовых звуков, которые следовали за помехами (Mapes-Riordan, Yost, 1999; Nieder et al., 2003; Arieh et al., 2005; Wagner, Scharf, 2006; Epstein, 2007). Эффект назван “вызванным снижением громкости”, его объясняли прямой маскировкой, связанной с процессами восстановления возбудимости, адаптации и торможения слуховых нейронов разных уровней (Mooge, 1997). Наши данные показали, что не только свойства суммации импульсных звуков, но и слуховая чувствительность слушателей могли влиять на временное разрешение и изменения громкости следующего за помехами тестового импульса. У слушателей первой группы коэффициенты корреляции выявили сильную и значимую связь между слуховой чувствительностью и изменениями громкости тестового импульса на пороге временного разрешения, т.е. чем хуже была слуховая чувствительность (выше пороги $Thpul$), тем меньше менялась громкость импульсов (меньше сдвиги порогов $dIso$ при T_{min}). Коэффициенты корреляции также выявили сильную и значимую связь между показателями суммации последовательностей импульсов и временным разрешением громкости тестовых импульсов, т.е. чем меньше были показатели P_{seq} , тем меньше были пороги T_{min} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучали влияние периода следования импульсов последовательности на обнаружение громкости тестового импульса, который был первым или последним. Для этого искали общие и индивидуальные закономерности временного разрешения и изменения громкости тестовых импульсов у слушателей с разной слуховой чувстви-

тельностью. Кроме этого, искали причины наблюдаемых явлений путем сравнения показателей временного разрешения и изменения громкости импульсов со слуховой чувствительностью слушателей, показателями пороговой временной суммации тонов и последовательностей импульсов.

Проведенный анализ причин наблюдаемых явлений у слушателей первой группы с нормальным слухом показал, что свойства суммации последовательностей импульсов влияли на временное разрешение и изменения громкости тестовых импульсов при их разных положениях в последовательности. Слуховая чувствительность проявлялась в изменениях громкости только тех тестовых импульсов, которые следовали за помехами. Можно предположить, что когда тестовый импульс опережал помеху, наблюдался эффект “частичной маскировки громкости”, а когда импульс следовал за помехой – эффект “вызванного снижения громкости. При этом свойства временной суммации тонов не проявлялись ни во временном разрешении, ни в изменениях громкости тестовых импульсов при любых положениях относительно помех.

У слушателей второй группы с нарушениями слуха временное разрешение громкости тестовых импульсов было хуже, а изменения громкости тестовых импульсов на пороге временного разрешения, наоборот, были незначительными.

Анализ причин явлений у слушателей двух групп показал, что слуховая чувствительность достоверно влияла на временное разрешение и изменения громкости только тех тестовых импульсов, которые следовали за последовательностями помеховых импульсов. Это указывало, что изменения слуховой чувствительности и связанные с ней изменения слуховой кратковременной адаптации могли приводить к ухудшению временного разрешения и изменений громкости тестовых импульсов.

Особенности временного разрешения громкости тестовых импульсов, а также различия изменений пороговой громкости тестовых импульсов, которые опережали или следовали за последовательностями помеховых импульсов, вполне могут влиять на восприятия отдельных фонем согласных звуков в последовательности других фонем. При повышении темпа речи восприятие отдельных фонем согласных может ухудшиться, а разборчивость речи – снизиться. Показатели dI_{50} и T_{min} , полагаем, могут выявить характер изменений пороговой громкости фонем в речевом потоке.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 14-04-00155 и № 17-04-00096).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Римская-Корсакова Л.К. Слуховая периферическая адаптация к коротким стимулам в слуховом облег-

чении распознавания интенсивности в шуме. *Сенсорные системы*. 2007. Т. 21. № 4. С. 286–298. <https://doi.org/10.7868/S032079191704013X>

- Римская-Корсакова Л.К. Периферическое кодирование и слуховое распознавание изменений уровней коротких высокочастотных стимулов, предъявляемых после маскеров. *Сенсорные системы*. 2011. Т. 25. № 4. С. 305–318.
- Arieh Y., Kelly K., Marks L.E. Tracking the time to recovery after induced loudness reduction (L). *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 117. № 6. P. 3381–3384. <https://doi.org/10.1121/1.2202867>
- Bacon S.P., Gleitman R.M. Modulation detection in subjects with relatively flat hearing losses. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1992. V. 35. № 3. P. 642–653. <https://doi.org/10.1044/jshr.3503.642>
- Bacon S.P., Viemeister N.F. Temporal modulation transfer functions in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Audiology*. 1985. V. 24. № 1. P. 117–134. <https://doi.org/10.3109/00206098509081545>
- Carlyon R.P., Buus S., Florentine M. Temporal integration of trains of tone pulses by normal and by cochlearly impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 8. № 1. P. 260–268. <https://doi.org/10.1121/1.399293>
- Fastl H., Zwicker E. *Psychoacoustics: Facts and Models*. 2007. Springer. 480 p.
- Fastl H. Temporal partial masking of pure tones by broadband noise: Experimental result and models. *Acta Acustica united with Acustica*. 1984. V. 54. № 1. P. 145–153.
- Fitzgibbons P.J., Gordon-Salant S. Age-related differences in discrimination of temporal intervals in accented tone sequences. *Hearing Research*. 2010. V. 264. № 1–2. P. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.11.008>
- Fitzgibbons P.J., Gordon-Salant S. Age effects in discrimination of repeating sequence intervals. *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 129. № 3. P. 1490–1500. <https://doi.org/10.1121/1.3533728>
- Florentine M., Fastl H., Buus S. Temporal integration in normal hearing, cochlear impairment, and impairment simulated by masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 1988. V. 84. № 1. P. 195–203. <https://doi.org/10.1121/1.396964>
- Formby C. Modulation threshold functions for chronically impaired Meniere patients. *Audiology*. 1987. V. 26. № 1. P. 89–102.
- Garner W.R., Miller G.A. The masked thresholds of pure tones as a function of duration. *J. Exp. Psychol.* 1947. V. 37. № 1. P. 293–303.
- Garner W.R. Auditory thresholds of short tones as a function of repetition rates. *J. Acoust. Soc. Am.* 1947. V. 19. № 3. P. 600–608. <https://doi.org/10.1121/1.1916527>
- Green D.M., Birdsall T.G., Tanner W.P. Signal detection as a function of signal intensity and duration. *J. Acoust. Soc. Am.* 1957. V. 29. № 1. P. 523–531. <https://doi.org/10.1121/1.1908951>
- Gelfand S.A. *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics*. Informa. Healthcare UK. 2010. 311 p.
- Elliott L.L. Temporal and masking phenomena in persons with sensorineural hearing loss. *Audiology*. 1975. V. 14. № 1. P. 336–353. <https://doi.org/10.3109/00206097509071748>

- Epstein M. An introduction to induced loudness reduction. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 122. № 3. EL74–80. <https://doi.org/10.1121/1.2761922>
- Mapes-Riordan D., Yost W.A. Loudness recalibration as a function of level. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. № 6. P. 3506. <https://doi.org/10.1121/1.428203>
- McFadden S.L., Quaranta N., Henderson D. Suprathreshold measures of auditory function in the aging chinchilla. *Hearing Res.* 1997. V. 111. № 1–2. P. 127–135. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(97\)00100-7](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(97)00100-7)
- Miller J., Aibel I.L., Green K. On the nature of rate-dependent processing during phonetic perception. *Perception and Psychophysics.* 1984. V. 35. № 1. P. 5–15.
- Mills D.M., Schmiedt R.A. Metabolic presbycusis: differential changes in auditory brainstem and otoacoustic emission responses with chronic furosemide application in the gerbil. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2004. V. 5. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10162-003-4004-3>
- Moore B.C.J. *An introduction to the psychology of hearing.* Academic Press. 1997. 413 p.
- Moore B.C.J., Shailer M.J., Schooneveldt G.P. Temporal modulation transfer functions for band-limited noise in subjects with cochlear hearing loss. *British Journal of Audiology.* 1992. V. 26. № 1. P. 229–237.
- Nieder B., Buus S., Florentine M., Scharf B. Interactions between test- and inducer-tone durations in induced loudness reduction. *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 114. № 5. P. 2846–2855. <https://doi.org/10.1121/1.1616580>
- Plomp R., Bouman M.A. Relation between hearing threshold and duration for tone pulses. *J. Acoust. Soc. Am.* 1959. V. 31. № 1. P. 749–758.
- Richards A.M. Loudness perception for short-duration tones in masking noise. *Journal of Speech and Hearing Research.* 1977. V. 20. № 1. P. 684–693.
- Scharf B. Partial masking. *Acustica.* 1964. V. 1. № 1. P. 16–23.
- Schmiedt R.A., Lang H., Okamura H.-O., Schulte B.A. Effects of furosemide chronically applied to the round window: a model of metabolic presbycusis. *J. Neurosci.* 2002. V. 22. № 21. P. 9643–9650.
- Viemeister N.F. Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds. *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 66. № 5. P. 1364–1380. <https://doi.org/10.1121/1.383531>
- Wagner E., Scharf B. Induced loudness reduction as a function of exposure time and signal frequency. *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119. № 2. P. 1012–1020. <https://doi.org/10.1121/1.2159430>
- Wingfield A., Poon L.W., Lombardi L.L., Lowe D. Speed of processing in normal aging: effects of speech rate, linguistic structure, and processing time. *J. Gerontol.* 1985. V. 40. № 5. P. 579–585. <https://doi.org/10.1093/geronj/40.5.579>
- Zwislocki J.J. Theory of temporal auditory summation. *J. Acoust. Soc. Am.* 1960. V. 32. № 1. P. 1046–1060. <https://doi.org/10.1121/1.1908276>
- Zwislocki J.J. Temporal summation of loudness: An analysis. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46. № 2. P. 431–441. <https://doi.org/10.1121/1.1911708>

Threshold loudness' changes for the first and last pulse in sequence in listeners with normal hearing and hearing loss

L. K. Rimskaya-Korsakova^{a, #}, and D. I. Nechaev^b

^a JSC Andreyev Acoustics Institute
117036 Moscow, Shvernika St. 4, Russia

^b Severtsov Institute of Ecology and Evolution
119071 Moscow, Leninsky Prospekt. 33, Russia

[#] E-mail: lkrk@mail.ru

The test pulses were the first or last in the pulse sequence with repetition period of T . The dependences of the detection threshold of test pulses loudness on the period T were obtained. The goal was to study the properties of temporal resolution and changes of test pulses loudness. Test pulse and 11 masking pulses have a center frequency of 4 kHz and a frequency band of 240 Hz. The level of masking pulses was 80 dB SPL. The period T varied in the range of 20–150 ms. Temporal resolution of the test pulse loudness corresponded to the minimum period, a T_{min} threshold, at which the listener could hear the test pulse. The pulse loudness changes, a $dIso$ shifts, were estimated as the difference between the detection thresholds of the test pulses presented in the pulse sequence with period T_{min} and in silence. The T_{min} threshold and the $dIso$ shifts were compared with the auditory sensitivity of the listeners, as well as with the temporal summation of tones and pulse sequences. Five listeners with normal hearing ~ 20 dB were included in first group and two listeners with high-frequency hearing loss of ~ 40 dB – in second group. For listeners of two groups, temporal resolution and loudness changes of the test pulses correlated with auditory sensitivity, but for listeners of the first group, the same properties correlated with temporal summation of the pulse sequences. For the listeners of the first group, the T_{min} threshold was of 25 ms when temporal summation of the pulse sequences were equal to ~ 2 dB, but increased up to 50–80 ms when the temporal summation increased up to ~ 6 dB. At the same time the $dIso$ shift reached 14–28 dB for the last test pulse, and 10–23 dB for the first test pulse. For the listeners of the second group, the T_{min} thresholds were high, ~ 80 –150 ms, and the $dIso$ shifts were low, ~ 0 –9 dB. The T_{min} threshold and the $dIso$ shift could characterize the auditory temporary processing of periodic sounds in the listeners.

Key words: loudness, impulse, periodic sequence, masking, summation

REFERENCES

- Rimskaya-Korsakova L.K. Slukhovaya perifericheskaya adaptatsiya k korotkim stimulam v slukhovom oblegchenii raspoznavaniya intensivnosti v shume [Auditory peripheral adaptation to short stimuli in auditory facilitation of recognition of intensity in noise]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems], 2007. V. 21 (3). P. 286–298 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S032079191704013X>.
- Rimskaya-Korsakova L.K. Perifericheskoye kodirovaniye i slukhovoye raspoznavaniye izmeneniy urovney korotkikh vysokochastotnykh stimulov, pred'yavlyayemykh posle maskerov [Peripheral coding and auditory recognition of changes in levels of short high-frequency stimuli presented after maskers]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems], 2011. V. 25 (4). P. 305–318 (in Russian).
- Arieh Y., Kelly K., Marks L.E. Tracking the time to recovery after induced loudness reduction (L). *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 117. № 6. P. 3381–3384. <https://doi.org/10.1121/1.2202867>
- Bacon S.P., Gleitman R.M. Modulation detection in subjects with relatively flat hearing losses. *J. Speech and Hearing Res.* 1992. V. 35. № 3. P. 642–653. <https://doi.org/10.1044/jshr.3503.642>
- Bacon S.P., Viemeister N.F. Temporal modulation transfer functions in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Audiology.* 1985. V. 24. № 1. P. 117–134. <https://doi.org/10.3109/00206098509081545>
- Carlyon R.P., Buus S., Florentine M. Temporal integration of trains of tone pulses by normal and by cochlearly impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 8. № 1. P. 260–268. <https://doi.org/10.1121/1.399293>
- Fastl H., Zwicker E. *Psychoacoustics: Facts and Models.* 2007. Springer. 480 p.
- Fastl H. Temporal partial masking of pure tones by broadband noise: Experimental result and models. *Acta Acustica united with Acustica.* 1984. V. 54. № 1. P. 145–153.
- Fitzgibbons P.J., Gordon-Salant S. Age-related differences in discrimination of temporal intervals in accented tone sequences. *Hearing Research.* 2010. V. 264. № 1–2. P. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.11.008>
- Fitzgibbons P.J., Gordon-Salant S. Age effects in discrimination of repeating sequence intervals. *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 129. № 3. P. 1490–1500. <https://doi.org/10.1121/1.3533728>
- Florentine M., Fastl H., Buus S. Temporal integration in normal hearing, cochlear impairment, and impairment simulated by masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 1988. V. 84. № 1. P. 195–203. <https://doi.org/10.1121/1.396964>
- Formby C. Modulation threshold functions for chronically impaired Meniere patients. *Audiology.* 1987. V. 26. № 1. P. 89–92.
- Garner W.R., Miller G.A. The masked thresholds of pure tones as a function of duration. *J. Exp. Psychol.* 1947. V. 37. № 1. P. 293–303.
- Garner W.R. Auditory thresholds of short tones as a function of repetition rates. *J. Acoust. Soc. Am.* 1947. V. 19. № 1. P. 600–608.
- Green D.M., Birdsall T.G., and Tanner W.P. Signal detection as a function of signal intensity and duration. *J. Acoust. Soc. Am.* 1957. V. 29. № 1. P. 523–531.
- Gelfand S.A. Hearing: An introduction to psychological and physiological acoustics. Informa. *Healthcare UK.* 2010. 311 p.
- Elliott L.L. Temporal and masking phenomena in persons with sensorineural hearing loss. *Audiology.* 1975. V. 14. № 1. P. 336–353.
- Epstein M. An introduction to induced loudness reduction. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 122. № 3. EL74–80. <https://doi.org/10.1121/1.2761922>
- Mapes-Riordan D., Yost W.A. Loudness recalibration as a function of level. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. № 6. P. 3506. <https://doi.org/10.1121/1.428203>
- McFadden S.L., Quaranta N., Henderson D. Suprathreshold measures of auditory function in the aging chinchilla. *Hearing Reserch.* 1997. V. 111. № 1–2. P. 127–135. [https://doi.org/10.1016/s0378-5955\(97\)00100-7](https://doi.org/10.1016/s0378-5955(97)00100-7)
- Miller J., Aibel I.L., Green K. On the nature of rate-dependent processing during phonetic perception. *Percept. Psychophys.* 1984. V. 35. № 1. P. 5–15.
- Mills D.M., Schmiedt R.A. Metabolic presbycusis: differential changes in auditory brainstem and otoacoustic emission responses with chronic furosemide application in the gerbil. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2004. V. 5. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10162-003-4004-3>
- Moore B.C.J. An introduction to the psychology of hearing. *Acad. Press.* 1997. 413 p.
- Moore B.C.J., Shailer M.J., Schooneveldt G.P. Temporal modulation transfer functions for band-limited noise in subjects with cochlear hearing loss. *British Journal of Audiology.* 1992. V. 26. № 1. P. 229–237.
- Nieder B., Buus S., Florentine M., Scharf B. Interactions between test- and inducer-tone durations in induced loudness reduction. *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 114. № 5. P. 2846–2855. <https://doi.org/10.1121/1.1616580>
- Plomp R., Bouman M.A. Relation between hearing threshold and duration for tone pulses. *J. Acoust. Soc. Am.* 1959. V. 31. № 1. P. 749–758.
- Richards A.M. Loudness perception for short-duration tones in masking noise. *J. Speech Hearing Research.* 1977. V. 20. № 1. P. 684–693.
- Scharf B. Partial masking. *Acustica.* 1964. V. 1. № 1. P. 16–23.
- Schmiedt R.A., Lang H., Okamura H.-O., Schulte B.A. Effects of furosemide chronically applied to the round window: a model of metabolic presbycusis. *J. Neurosci.* 2002. V. 22. № 21. P. 9643–9650.
- Viemeister N.F. Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds. *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 66. № 5. P. 1364–1380. <https://doi.org/10.1121/1.383531>
- Wagner E., Scharf B. Induced loudness reduction as a function of exposure time and signal frequency. *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119. № 2. P. 1012–1020. <https://doi.org/10.1121/1.2159430>
- Wingfield A., Poon L.W., Lombardi L.L., Lowe D. Speed of processing in normal aging: effects of speech rate, linguistic structure, and processing time. *J. Gerontol.* 1985. V. 40. № 5. P. 579–585. <https://doi.org/10.1093/geronj/40.5.579/>
- Zwislocki J.J. Theory of temporal auditory summation. *J. Acoust. Soc. Am.* 1960. V. 32. № 1. P. 1046–1060. <https://doi.org/10.1121/1.1908276>
- Zwislocki J.J. Temporal summation of loudness: An analysis. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46. № 2. P. 431–441. <https://doi.org/10.1121/1.1911708>