

## ПОРОГОВАЯ И НАДПОРОГОВАЯ МАСКИРОВКА ГРОМКОСТИ ТЕСТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ, ВЫЗВАННАЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСОВ

© 2020 г. Л. К. Римская-Корсакова<sup>1,\*</sup>, Д. И. Нечаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО Акустический институт им.акад. Н.Н. Андреева, Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, Москва, Россия

\*e-mail: lkrk@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

После доработки 03.07.2020 г.

Принята к публикации 10.07.2020 г.

С целью поиска показателей временной обработки периодических звуков изучали влияние периодичности последовательности помеховых импульсов на временное разрешение и маскировку громкости тестового импульса, который был первым или последним в последовательности. В измерениях участвовали слушатели с нормальным слухом и нейросенсорной тугоухостью, вызванной старением. Задержка тестового импульса  $D$  относительно помехи была равна периоду следования помеховых импульсов  $T$  ( $D = T$ ). Центральные частоты и частотные полосы всех импульсов были равны 4 кГц и 240 Гц. При таких условиях основой обнаружения тестовых импульсов могла быть его громкость. Интенсивность помеховых импульсов  $I_m$  составляла 80 дБ УЗД. Варьировали период  $T$  в диапазоне 20–150 мс и интенсивность тестового импульса  $I_s$  в диапазоне 0–85 дБ. За порогом временного разрешения громкости тестового импульса принимали минимальный период  $T_{\min}$ , начиная с которого слушатель мог обнаружить импульс. Пороговую маскировку громкости тестового импульса ( $I_s \ll I_m$ ) оценивали по сдвигу  $SI_O$  порога его обнаружения в последовательности относительного порога, полученного в тишине. Надпороговую маскировку громкости тестового импульса ( $I_s \sim I_m$ ) оценивали по сдвигам  $SdI_U$  и  $SdI_D$  порогового инкремента и декремента интенсивности замаскированного тестового импульса относительно порогового инкремента интенсивности одиночного помехового импульса. Сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$  зависели от периода  $T$ , от положения тестового импульса относительно помехи и слуховой чувствительности слушателей. Самые большие сдвиги регистрировали на пороге временного разрешения громкости. У слушателей с нормальным слухом порог  $T_{\min}$  составил 25 мс, а сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$  вблизи  $T_{\min}$  – 12 и 18 дБ, если тестовый импульс опережал помеху, но 23 и 0 дБ, если тестовый импульс следовал за помехой. У слушателей с тугоухостью порог  $T_{\min}$  возрос до 80–150 мс, а сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$  составили 1 и 4 дБ, если тестовый импульс опережал помеху, но 4 и 7 дБ, если тестовый импульс следовал за помехой. Информационная значимость показателей  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  и  $SdI_D$  была подтверждена обнаружением их проявлений в профилях зависимостей порогов обнаружения тестовых импульсов от задержки  $D$  ( $D \neq T$ ). Показатели  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  и  $SdI_D$  могли быть характеристиками временного восприятия периодических звуков, в том числе речи. Анализировали причины, вызывающие пороговую и надпороговую маскировку громкости импульсов при разных их положениях относительно периодических помех.

**Ключевые слова:** последовательности импульсов, изменение громкости, временное разрешение, маскировка, суммация, адаптация

DOI: 10.31857/S0044452920060078

### ВВЕДЕНИЕ

Слуховая временная обработка играет важную роль в распознавании речи. Повышение темпа речи может ухудшить ее понимание, однако такое ухудшение не обязательно может быть связано со снижением слуховой чувствительности слушателей.

Темп речи оценивают числом элементарных речевых единиц, произнесенных в единицу времени [1]. Оптимальный темп составляет 9–14 звуковых

единиц за 1 секунду (период следования  $T \sim 70$ –110 мс). У здоровых людей темп речи может возрасти до 15–20 ед./с ( $T \sim 50$ –67 мс). При речевых отклонениях, таких как тахилалия и брадилалия, темп может быть более 20 ед./с ( $T < 50$  мс) или менее 9 ед./с ( $T > 110$  мс). Абсолютный темп речи зависит от индивидуальных особенностей говорящего, его эмоционального состояния, ситуации общения и стиля произношения, определяется свойствами слухового восприятия темпа речи.

Считается, что для понимания речи выделение согласных по сравнению с гласными важнее, но сложнее, поскольку число согласных больше, согласные являются более тихими и короткими (~10–150 мс), имеют более высокочастотный состав (1–5 кГц). Укорочение длительности гласных способствует повышению темпа речи, что, в свою очередь, ведет к ухудшению временного разрешения и маскировке согласных за счет увеличения частоты их следования в речевом потоке. В таком случае следует ожидать проявления эффектов временной последовательной (прямой и обратной) маскировки отдельных согласных последовательностями “помеховых” согласных.

Известно, что помехи могут не полностью маскировать импульсные звуки, вызывая снижение их громкости [2]. Снижение громкости называют “временной частичной маскировкой громкости” (temporal partial masking of test pulse loudness), если тестовый звук опережает помеху [3, 4], или “вызванным снижением громкости” (induced loudness reduction of test pulse), если тестовый звук следует за помехой [5–7]. Это значит, что повышение темпа речи может ухудшить временное разрешение громкости согласных, а также снизить их громкость за счет эффектов последовательной маскировки. Закономерно возникают вопросы. Можно ли оценить влияние темпа речи на временное разрешение и величину маскировки громкости согласных? Какие показатели слуховой временной обработки могут обнаружить это влияние? Как изменения слуховой чувствительности слушателей могут влиять на такие показатели?

В работах, изучающих особенности восприятия речи, за модель согласного часто принимают узкополосный тональный импульс, который предъявляют до, после или внутри последовательностей помеховых импульсов [8, 9]. Чтобы оценить изменения громкости такого импульса, его громкость сравнивают с громкостью эталонного звука [3–7]. В данной работе для оценки влияния темпа последовательности помеховых импульсов (моделей помеховых согласных) на временное разрешение громкости и величину маскировки громкости тестовых импульсов (модели тестового согласного) мы применили другой подход. Была использована парадигма временной последовательной маскировки, а также определены условия, в которых слушатель может обнаруживать замаскированный тестовый импульс только на основании его громкости.

В парадигме маскировки слушатель обнаруживает тестовый звук, сравнивая помеху со звуковым комплексом, включающим в себя помеху и тестовый звук. Помехе, представляющей собой последовательность импульсов с периодом следования  $T$ , присущи громкость, высота периодичности и тембр. За высоту периодичности отвечает частота,

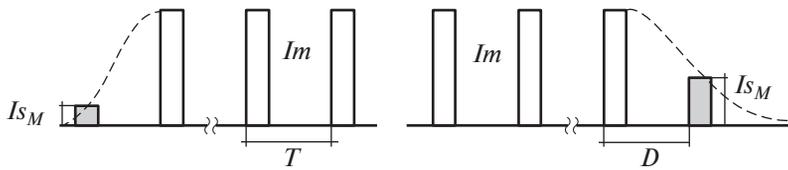
обратно пропорциональная периоду следования импульсов,  $F_0 = 1/T$ , а тембр характеризует область возбуждения базилярной мембраны (БМ), определяемая спектром помеховых импульсов и имеющая изрезанность с частотой в  $1/T$ . Звуковой комплекс, наряду с перечисленными выше качествами помехи, имеет другие качества. Слушатель может обнаружить присутствующий в комплексе тестовый импульс на основании его громкости, а также на основании дополнительных субъективных качеств комплексов, связанных с задержкой тестового импульса  $D$  относительно помеховых импульсов; с различиями спектрально-временных качеств помеховых и тестовых импульсов, с различиями длительностей помехи и комплекса. Если исключить дополнительные качества, то слушатель сможет обнаружить тестовый импульс на основании его громкости. Для этого задержку  $D$  между тестовым импульсом и помехой следует установить равной периоду следования импульсов помехи  $T$  ( $T = D$ ). Частотно-временные характеристики тестовых и помеховых импульсов нужно выбрать одинаковыми, а их частотные полосы ограничить шириной критической полосы слуха на частоте максимума спектра импульсов. Чтобы длительности помехи и комплекса были субъективно равными, следует использовать не один, а 11 помеховых импульсов [10]. Тогда, варьируя период следования импульсов помехи  $T$  ( $T = D$ ) в диапазоне, соответствующем темпам речевых сообщений, можно оценить минимальный период  $T_{\min}$ , при котором слушатель может выделить громкость тестового импульса. Период  $T_{\min}$  характеризует временное разрешение громкости тестового импульса и может быть порогом временного разрешения громкости.

Наряду с порогом  $T_{\min}$  можно оценить другие показатели последовательной маскировки громкости тестовых импульсов (рис. 1). Обозначим интенсивность тестового импульса как  $I_s$ , а интенсивность импульсов помех как  $I_m$ , и рассмотрим три случая.

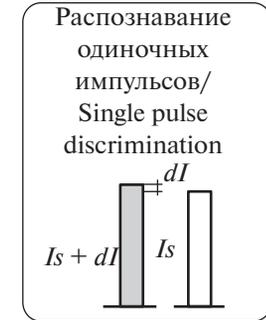
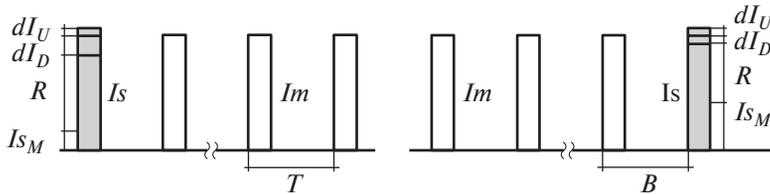
В первом случае  $I_s \ll I_m$  (рис. 1, 1). Порог обнаружения замаскированного импульса обозначим как  $I_{sM}$ , а порог обнаружения импульса, предъявляемого в тишине, как  $I_{sT}$ . При периоде  $T > T_{\min}$  сдвиг порога  $SI_0$ , равный разности порогов  $I_{sM}$  и  $I_{sT}$ , может указать на изменение интенсивности, необходимое для появления ощущения громкости замаскированного тестового импульса. Зависимость сдвига  $SI_0$  от периода  $T$  обнаружит изменение во времени маскировки громкости тестового импульса при его обнаружении или временное изменение пороговой маскировки громкости тестового импульса.

При равенстве интенсивностей тестовых и помеховых импульсов ( $I_s = I_m$ ) слушатель не может обнаружить тестовый импульс. Однако если интенсивность  $I_s$  повысить или понизить относитель-

I. Обнаружение/Detection



II. Распознавание/Discrimination



III. Показатели маскировки/Masking indicators:

$$T_{\text{mni}}; SI_0 = Is_M - Is_T; SdI_D = dI_D - dI; SdI_U = dI_U - dI; R = Im - dI_D - Is_M$$

**Рис. 1.** Схематичное представление звуковых комплексов, включающих в себя тестовые импульсы (серый цвет), которые опережали помеховые импульсы или следовали за ними.

*Обозначения:*  $D$  – задержка тестового импульса относительно помехи;  $T$  – период следования помеховых импульсов,  $T = D$ ,  $Is$  и  $Im$  – интенсивности тестового и помеховых импульсов. Серым цветом выделены тестовые импульсы, белым цветом – помеховые импульсы. I. Первый случай, когда  $Is \ll Im$ . Слушатель обнаруживал тестовый импульс. Пунктиром отмечено влияние процессов маскировки. II. Второй и третий случаи, когда  $Is < Im$  и  $Is > Im$ . Слушатель распознавал тестовый и помеховые импульсы. III. Показатели временной маскировки. В овалах указаны дополнительные данные для вычисления показателей маскировки.  $Is_M$  и  $Is_T$  – пороги обнаружения громкости тестового импульса, предъявляемого в присутствии и отсутствия помех;  $dI_U$  и  $dI_D$  – пороговые инкременты и декременты интенсивности тестовых импульсов, предъявляемых в присутствии помех;  $dI$  – пороговый инкремент интенсивности одиночного импульса с интенсивностью  $Im$ ;  $SI_0$ ,  $SdI_D$  и  $SdI_U$  – сдвиги порогов обнаружения и распознавания;  $R$  – диапазон интенсивностей, в котором слушатель обнаруживал тестовый импульс.

**Fig. 1.** Schematic representation of sound complexes that include test pulses (gray) presented before or after masking pulse trains.

*Designations:*  $D$  – delay of the test pulse relative to the masking pulse train;  $T$  – repetition period of masking pulses,  $T = D$ ,  $Is$  and  $Im$  – intensities of test and masking pulses. Test pulses are highlighted with gray, masking pulses are white. I. First case, when  $Is \ll Im$ . The listener detects a test pulse. The dotted line indicates the effect of masking processes. II. The second and third cases, when  $Is < Im$  and  $Is > Im$ . The listener recognizes test and masking pulses. III. Indicators of temporal masking. Additional data for calculating the indicators are shown in oval.  $Is_M$  and  $Is_T$  – detection thresholds of the test pulse loudness estimated in the presence and absence of the masking pulse train;  $dI_U$  and  $dI_D$  – threshold intensity increments and decrements for test pulses presented before or after masking pulse trains;  $dI$  – threshold intensity increment of a single pulse with  $Im$  intensity;  $SI_0$ ,  $SdI_D$  and  $SdI_U$  – shifts in intensity detection and discrimination thresholds;  $R$  – the range of intensities in which the listener could detect a test impulse.

но интенсивности  $Im$ , то слушатель обнаружит тестовый импульс, решая задачу распознавания интенсивностей тестового и помехового импульсов (рис. 1, II, III). Пороговый инкремент и декремент интенсивности обозначим как  $dI_U$  и  $dI_D$ . Если периодическая помеха влияет на распознавание, то инкремент  $dI_U$  или декремент  $dI_D$  будут отличаться от порогового инкремента  $dI$ , определенного при распознавании интенсивности незамаскированного импульса с интенсивностью  $Im$ . Можно вычислить сдвиги порогов распознавания  $SdI_U$  и  $SdI_D$  как разности  $dI_U - dI$  и  $dI_D - dI$ , тогда положительные значения сдвигов укажут на изменения интенсивности, необходимые для появления ощущения громкости замаскированного тестового импульса. Зависимость сдвигов от периода  $T$  выявит времен-

ные изменения маскировки громкости тестового импульса при его *опознании на фоне помеховых импульсов* или временное изменение *надпороговой* маскировки громкости тестового импульса.

Есть основания полагать, что при  $Is < Im$  (рис. 1, II) слушатель может обнаружить тестовый импульс при условии временного разрешения громкости тестового импульса, и поэтому сдвиг  $SdI_D$  может зависеть от  $T$ . При  $Is > Im$  (рис. 1, III) слушатель может обнаружить тестовый импульс на основании инкремента интенсивности  $dI_U$ , не обязательно разрешая громкость тестового импульса во времени. Поэтому сдвиг  $SdI_U$  может быть равен нулю при любых  $T$ .

*Цель и задачи работы.* В интересах поиска показателей временной обработки периодических зву-

ков изучали влияние периодичности последовательности помеховых импульсов (моделей последовательностей помеховых согласных звуков) на временное разрешение и маскировку громкости тестового импульса (модели тестового согласного звука), который был первым или последним в последовательности. В измерениях участвовали молодые слушатели с нормальным слухом и пожилые слушатели с нейросенсорной тугоухостью (НСТ). Мы полагали, что характерное для поздних периодов онтогенеза снижение слуховой чувствительности в области высоких частот не может не отразиться на восприятии громкости высокочастотных согласных и поэтому на восприятии речи в целом.

Для достижения цели были измерены показатели  $T_{\min}$ ,  $SI_O$ ,  $SdI_D$  и  $SdI_U$  при предъявлении тестовых импульсов до или после последовательностей помеховых импульсов с разными периодами следования  $T$ . Показатели  $T_{\min}$ ,  $SI_O$ ,  $SdI_D$  и  $SdI_U$  характеризовали временное разрешение громкости тестовых импульсов, пороговую и надпороговую маскировку их громкости. Задержка  $D$  тестового импульса относительно помехи была равна периоду  $T$  ( $T = D$ ). Мы искали те показатели маскировки громкости, которые зависели от периода  $T$ , положения тестового импульса относительно помехи и слуховой чувствительности слушателей.

За последовательную прямую и обратную маскировку отвечают различные нейрофизиологические процессы: суммации, нейронной адаптации, торможения, межнейронного взаимодействия [11, 12]. Среди причин, вызывающих прямую маскировку, выделяют адаптацию [13], а к причинам, отвечающим за обратную маскировку, относят суммацию [3, 14]. Поэтому показатели  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  и  $SdI_D$ , как мы полагали, позволяют оценить участие суммации и адаптации в формировании громкости замаскированных импульсов.

Чтобы подтвердить информационную значимость показателей  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  и  $SdI_D$ , мы также измерили кривые маскировки как зависимости порогов обнаружения тестовых импульсов от задержки  $D$ . Помехами были последовательности импульсов с разными периодами следования  $T$  и одиночный импульс. В профилях кривых маскировки, полученных при  $T \neq D$ , мы искали проявления временного разрешения громкости и маскировки громкости тестовых импульсов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения порогов обнаружения тестовых импульсов, предъявляемых до или после последовательностей помеховых импульсов, проводили в звукозаглушающей камере. Использовали аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий генерацию звуков, управление экспериментом и протоколирование данных [10, 15, 16].

Во всех измерениях испытательная последовательность имела два звуковых отрезка, разделенных паузой в 500 мс. Один отрезок содержал положительный стимул (помеха и тестовый сигнал), другой – отрицательный (только помеха). Звуковые отрезки формировали по ходу ведения эксперимента цифровым способом в виде файлов и проигрывали 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 был положительный стимул. Испытательную последовательность подавали на правое ухо слушателя через головные телефоны Shennheiser HD-265.

*Тестовые и помеховые импульсы.* Схематичное изображение звуковых комплексов, содержащих помеху и тестовый импульс, представлено на рис. 1. Тестовый и помеховые импульсы имели сходные характеристики. Они имели огибающие в форме гауссовой функции и синусоидальное заполнение с частотой 4 кГц. Ширина частотной полосы на уровне 0.7 была равна 240 Гц. Уровень импульсов помехи  $Im$  составлял 80 дБ УЗД.

Чтобы определить интенсивность импульсов, их пиковую амплитуду сопоставляли с амплитудой непрерывного тона, выраженную в дБ УЗД, где УЗД – это уровень звукового давления, оцененный логарифмом отношения данного звукового давления к опорному звуковому давлению, равному 20 мкПа. Амплитуды непрерывного тона измеряли шумомером Robotron 0024 в пространстве между головным телефоном и правым ухом каждого слушателя.

Тестовый импульс предъявляли в тишине, до или после помеховых импульсов. Период следования помеховых импульсов  $T$  и задержка тестового импульса относительно помеховых импульсов  $D$  были равны друг другу,  $T = D$ . Период  $T$  задавали равным 20, 25, 30, 40, 50, 80, 120 или 150 мс. Помеха включала в себя 11 импульсов [10].

*Основная серия измерений.* Пороги обнаружения тестовых импульсов оценивали по психометрическим кривым или зависимостям вероятности правильного обнаружения тестового импульса от его интенсивности. Тестовые импульсы разных интенсивностей предъявляли по 10 раз. Интенсивности выбирали случайным образом. За порог обнаружения тестового импульса принимали интенсивность, при которой процент правильных ответов был равен 75%. По психометрическим кривым определяли минимальный период  $T_{\min}$ , начиная с которого слушатель мог обнаружить тестовый импульс. При разных периодах  $T$  определяли сдвиги порогов  $SI_O$ ,  $SdI_D$  и  $SdI_U$  (рис. 1). Помимо этого, при  $I_s < I_m$  определяли диапазон интенсивностей  $R$

**Таблица 1.** Сведения о слушателях  
**Table 1.** Information about listeners

Слушатель/ Listener	Возраст, лет/ Age, years	Пол/ Gender	Порог обнаружения импульса, дБ/ Pulse detection threshold, dB	Опыт участия в экспериментах, часы, * – музыкант-любитель/Experimental experience, h; * – amateur musician
C1	35	М/М	17	>60*
C2	63	Ж/W	26	>60
C3	58	Ж/W	59	>60
C4	75	Ж/W	59	>60
C6	25	Ж/W	10	>20
C7	35	М/М	15	~20*
C8	29	М/М	16	>10
C9	28	М/М	16	~3*

(рис. 1, I и II), в котором слушатель мог выделить громкость тестового импульса.  $R = I_m - I_{sM} - dI_D$  (рис. 1, III). Мы ожидали, что ширина диапазона  $R$ , как и сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$ , зависит от  $T$ .

В дополнительной серии измерений для определения порогов обнаружения тестовых импульсов использовали адаптивный двухинтервальный двухальтернативный метод вынужденного выбора. Помехой был одиночный импульс или последовательность из 8 импульсов (рис. 1, I). Период следования помеховых импульсов  $T$  составлял 40, 50, 60, 80 или 100 мс. Варьируемым параметром была задержка  $D$  между тестовым импульсом и помехой ( $T \neq D$ ). Помеха могла опережать тестовый импульс или следовать за ним. В начале измерений интенсивность тестового импульса в положительном стимуле была заведомо надпороговой. Слушатель сравнивал положительный и отрицательный стимулы и определял, в каком из интервалов присутствует тестовый импульс. После двух правильных ответов пиковая амплитуда тестового импульса уменьшалась на 30%, однако после одного неправильного ответа она увеличивалась 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 и за порог принимали медиану, вычисленную на основании шести измерений. В результате измерений получали зависимости порогов обнаружения тестовых импульсов от задержки  $D$ .

*Слушатели.* Таблица 1 содержит информацию о слушателях, принявших участие в измерениях. В

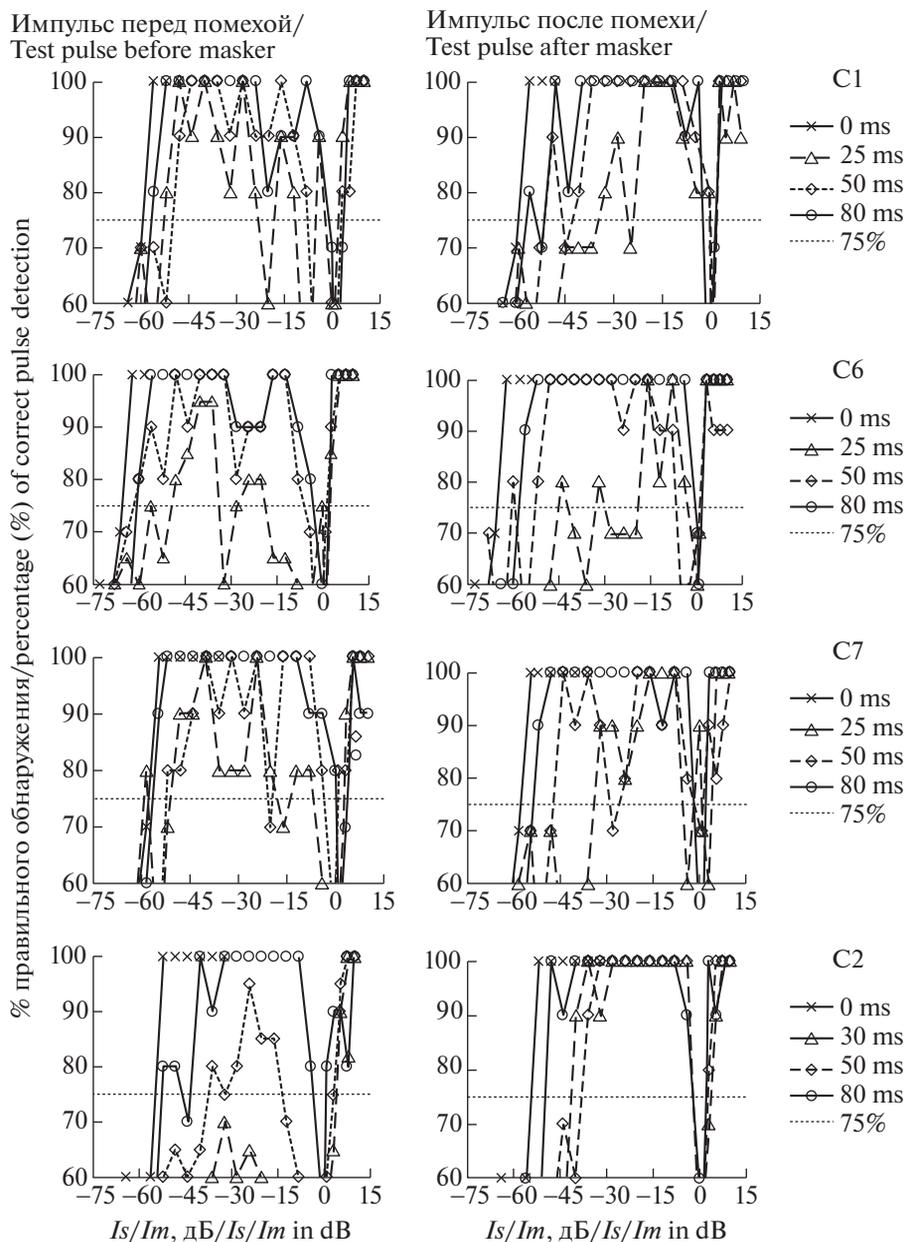
основной серии измерений участвовали четыре слушателя C1, C2, C6 и C7 с нормальным слухом и два пожилых слушателя C3 и C4 с нейросенсорной тугоухостью (НСТ).

Диагноз НСТ был поставлен в медицинских учреждениях, куда слушатели C3 и C4 обращались с жалобами на снижение разборчивости речи. Аудиограммы, полученные для двух ушей у двух слушателей, выявили сходное повышение порогов слышимости тонов высоких частот. Зависимости порогов слышимости от частоты тонов были близки к норме при частотах, меньших 1 кГц, но возрастали от 0–10 дБ на частоте в 1 кГц до 60–90 дБ на частоте в 8 кГц. Костно-воздушный разрыв порогов слышимости был мал, либо отсутствовал. Это указывало на симметричную нейросенсорную тугоухость III степени. Слушателю C4 проведена слуховая коррекция с помощью слухового аппарата на одно ухо.

В дополнительной серии участвовали трое слушателей с нормальным слухом (C2, C8, C9) и один слушатель с НСТ (C4). В табл. 1 указаны: порог обнаружения тестовых импульсов с центральной частотой 4 кГц, шириной полосы 240 Гц в тишине, возраст, пол, предварительный опыт участия в слуховых измерениях в часах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Психометрические кривые или зависимости вероятности правильного обнаружения тестового импульса, предъявляемого в тишине, до или после последовательностей помеховых импульсов, от интенсивности тестового импульса, приведенной к интенсивности помеховых импульсов, представлены на рис. 2 и 3. Данные рис. 2 были получены для слушателей C1, C2, C6 и C7 с нормальным слухом, а данные рис. 3 – для слушателей C3 и C4 с НСТ. Поскольку внутри групп слушателей данные были сходными, они были усреднены (рис. 4) и по ним были вычислены показатели маскировки  $T_{min}$ ,  $SI_O$ ,



**Рис. 2.** Психометрические кривые или зависимость процента (%) правильного обнаружения тестового импульса, предъявляемого в тишине, а также до (слева) и после (справа) последовательности импульсов помехи, от интенсивности тестового импульса. В измерениях участвовали 4 слушателя с нормальным слухом.

*Обозначения:* Интенсивность импульсов помех – 80 дБ УЗД. Абсцисс – отношение интенсивностей тестового импульса и импульсов помехи,  $I_s/I_m$ ; легенда – слушатель и интервал между импульсами помехи  $T$  ( $T = D$ ). При  $T = 0$  мс помехой был одиночный импульс.

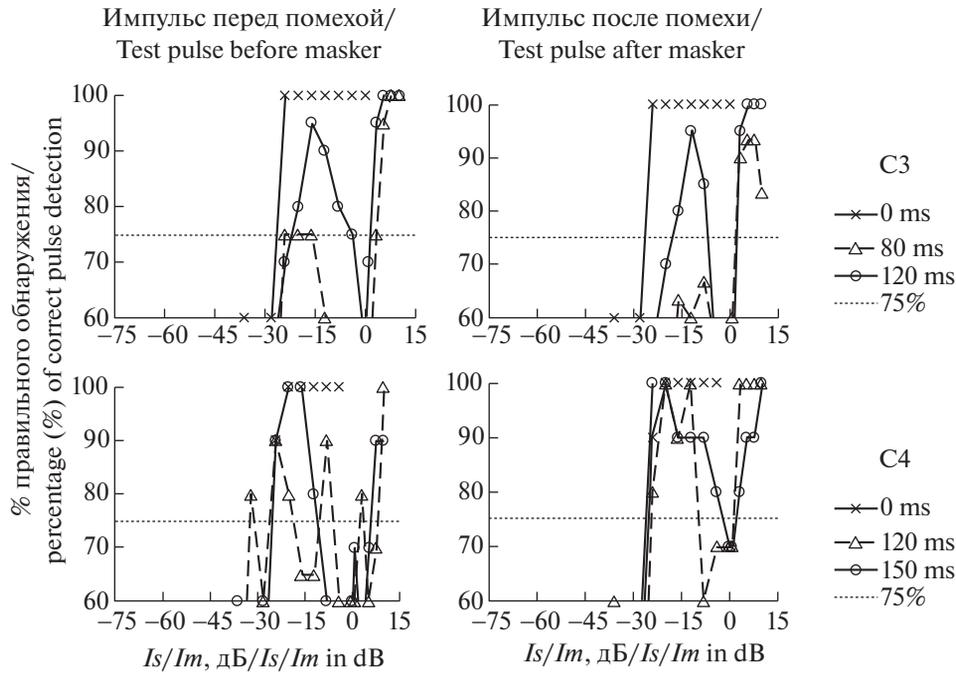
**Fig. 2.** Psychometric curves or dependences of the percentage (%) of correct test pulse detection on the pulse intensity. The test pulses are presented in silence, before (left) and after (right) masking pulse trains. Four listeners with normal hearing were involved in the measurements.

*Designations:* The intensity of the masking pulses is 80 dB SPL. Abscissa – the intensity ratio of test and masking pulses,  $I_s/I_m$ , dB; legend – the listener and the repetition period of masking pulses,  $T$ , ms ( $T = D$ ). At  $T = 0$  ms, the masker was a single pulse.

$SdI_D$ ,  $SdI_U$  и  $R$  (табл. 2). Ниже обсуждаются усредненные данные.

Как следует из рис. 2–4 при большом числе помеховых импульсов при равенстве  $T = D$ , а также при равенстве интенсивностей тестовых и помехо-

вых импульсов ( $I_s/I_m = 0$ ) слушатели не могли обнаружить тестовый импульс. Изменения интенсивности тестовых импульсов  $I_s$  относительно интенсивности помеховых  $I_m$  способствовали обнаружению тестового импульса. Если интенсивность тестового



**Рис. 3.** Психометрические кривые или зависимость процента (%) правильного обнаружения тестового импульса. В измерениях участвовали 2 слушателя с нейросенсорной тугоухостью. Остальные обозначения – те же, что на рис. 2.

**Fig. 3.** Psychometric curves or dependences of the percentage (%) of correct test pulse detection on the pulse intensity. Two listeners with sensorineural hearing loss were involved in the measurements. Other designations are the same as in Fig. 2.

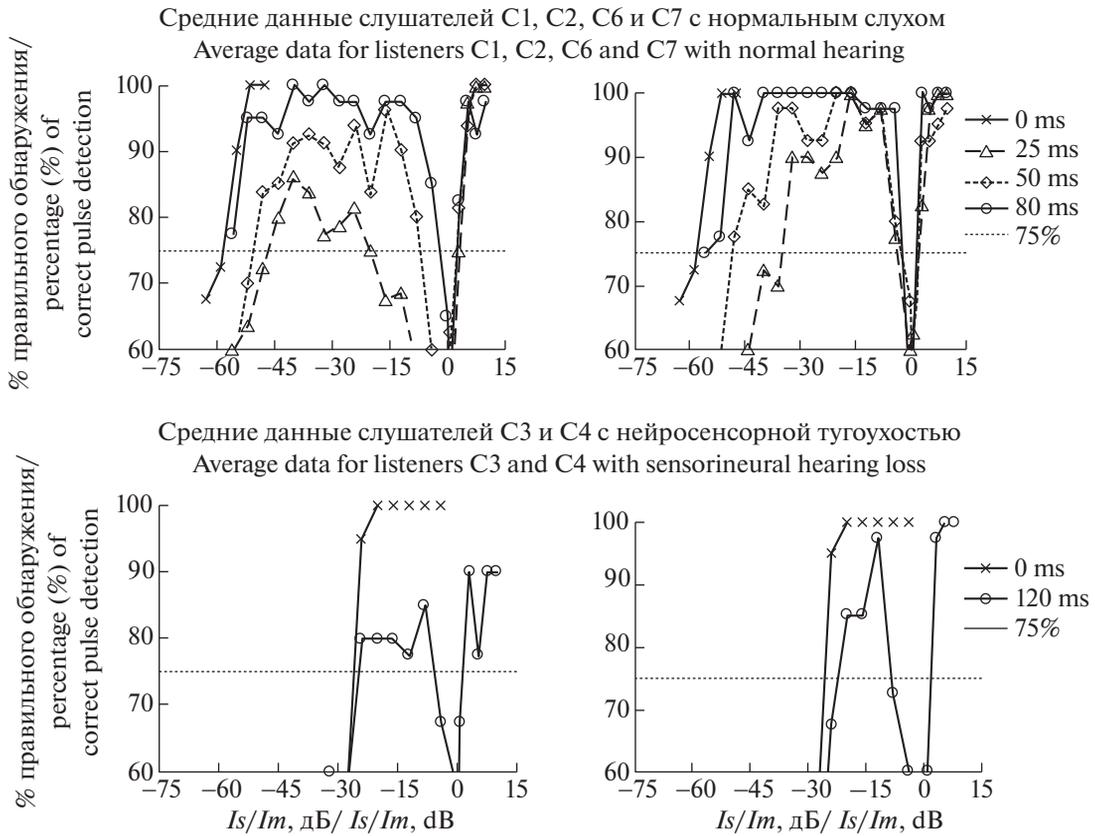
импульса  $I_s$  превышала интенсивность помехового импульса  $I_m$  ( $I_s > I_m$ ), то сдвиг  $SdI_U$  был равен нулю у всех слушателей при любых периодах  $T$  и положениях тестового импульса относительно помехи (табл. 2). Другими словами, при  $I_s > I_m$  периодическая помеха не влияла на обнаружение тестового импульса, и *надпороговая* маскировка громкости импульсов отсутствовала.

Другие результаты были получены, когда интенсивность  $I_s$  была меньше интенсивности  $I_m$ . При  $I_s < I_m$  можно найти минимальный период следования импульсов помехи  $T_{min}$ , начиная с которого слушатель мог обнаружить тестовой импульс (табл. 2). У слушателей с нормальным слухом период  $T_{min}$  был равен  $\sim 25$  мс при любых положениях тестового импульса относительно по-

**Таблица 2.** Показатели маскировки, вычисленные на основании усредненных психометрических кривых (рис. 4) для слушателей с разной слуховой чувствительностью. В отсутствие маскировки диапазон  $R$  был равен  $\sim 60$  дБ у слушателей с нормальным и  $\sim 30$  дБ у слушателей с нейросенсорной тугоухостью

**Table 2.** Masking indicators calculated on the basis of averaged psychometric curves (Fig. 4) for listeners with different auditory sensitivity. In the absence of masking, the R range was  $\sim 60$  dB for listeners with normal or  $\sim 30$  dB with sensorineural hearing loss

Импульс перед помехой/Test pulse before masker					Импульс после помехи/Test pulse after masker				
$T$ , мс	$SI_O$ , дБ	$SdI_D$ , дБ	$SdI_U$ , дБ	$R$ , дБ	$T$ , мс	$SI_O$ , дБ	$SdI_D$ , дБ	$SdI_U$ , дБ	$R$ , дБ
Средние данные слушателей C1, C2, C6 и C7 с нормальным слухом/ Averaged data for listeners C1, C2, C6 and C7 with normal hearing									
25	12	18	0	28	25	23	0	0	31
50	8	9	0	40	50	10	0	0	43
80	2	0	0	56	80	3	0	0	53
Средние данные слушателей C3 и C4 с нейросенсорной тугоухостью/ Averaged data for listeners C3 and C4 with sensorineural hearing loss									
120	1	4	0	23	120	4	7	0	17



**Рис. 4.** Усредненные психометрические кривые для слушателей с нормальным слухом (вверху) и нейросенсорной тугоухостью (внизу) ( $T = D$ ). Остальные обозначения – те же, что на рис. 2.  
**Fig. 4.** Averaged psychometric curves for listeners with normal hearing (above) and sensorineural hearing loss (below). Other designations are the same as in Fig. 2.

мехи. У слушателей с НСТ минимальный период  $T_{min}$  варьировал от 80 до 150 мс и зависел от положения тестового импульса.

Наибольшую *пороговую* (сдвиги  $SI_O$  при  $Is \ll Im$ ) и *надпороговую* (сдвиги  $SdI_D$  при  $Is < Im$ ) маскировку громкости тестовых импульсов регистрировали при периоде  $T_{min}$ . С ростом  $T$  сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$  снижались. Кроме этого, они зависели от положения тестового импульса относительно помехи, а также слуховой чувствительности слушателей.

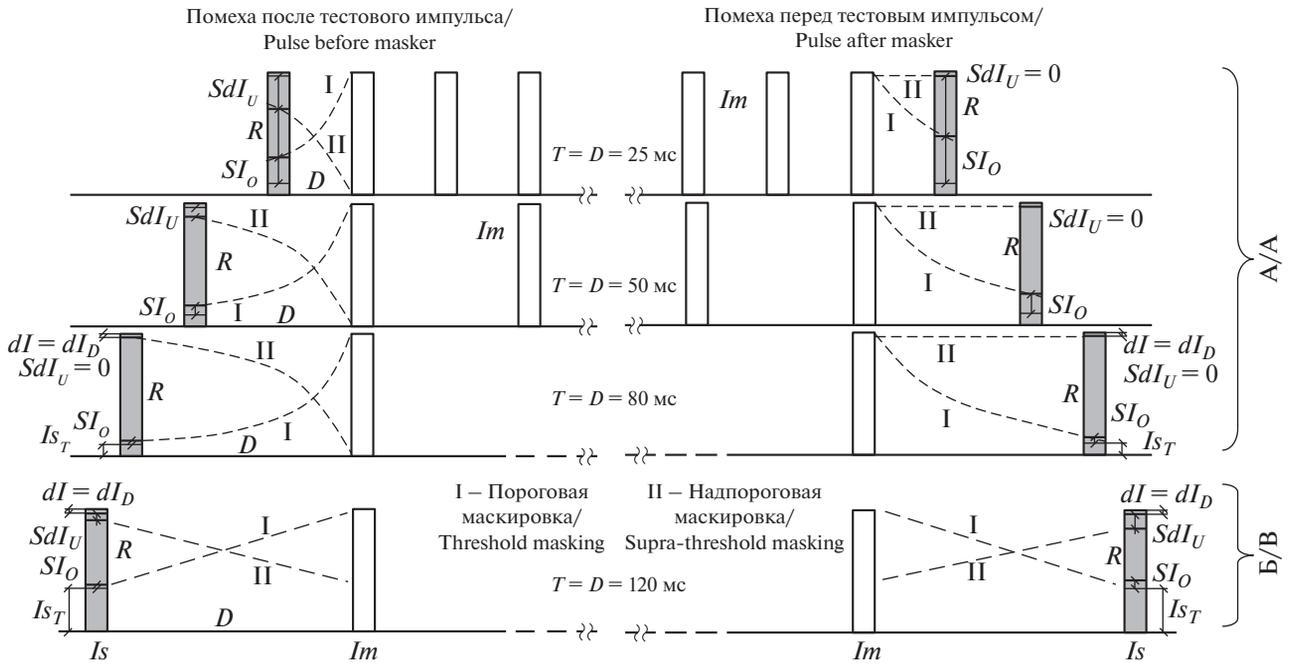
Рассмотрим особенности маскировки громкости у слушателей с нормальным слухом (рис. 4 и табл. 2). Если тестовый импульс опережал помеху, то периодическая помеха вызывала *пороговую* и *надпороговую* маскировку ( $SI_O > 0$  дБ и  $SdI_D > 0$  дБ). Сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$  были соответственно равны 12 и 18 дБ при  $T_{min}$  в 25 мс, и уменьшались до 2 и 0 дБ при  $T$  в 80 мс (табл. 2). Если тестовый импульс следовал за помехой, то периодическая помеха вызывала только *пороговую* маскировку ( $SI_O > 0$ , а  $SdI_D = 0$ ). Сдвиг  $SI_O$  был равен 23 дБ при  $T_{min}$  в 25 мс и понижался до 3 дБ при  $T$  в 80 мс.

У слушателей с нормальным слухом при больших  $T$  ( $T \gg T_{min}$ ) диапазон интенсивностей  $R$  мог достигать  $\sim 60$  дБ (рис. 1 и табл. 2). Однако на пороге временного разрешения, т.е. при  $T_{min}$ , диапазон  $R$  сокращался вдвое и составлял  $\sim 30$  дБ. Это было справедливо для разных положений тестового импульса относительно помехи.

Таким образом, сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$ , выявляющие пороговую и надпороговую маскировку громкости тестовых импульсов, зависели от периодичности помехи.

Для слушателей C3 и C4 с НСТ и при  $Is < Im$  обнаружение громкости тестового импульса было более сложной задачей, чем для слушателей с нормальным слухом. У слушателей C3 и C4 периоды  $T_{min}$  были большими, равными  $\sim 80$ –150 мс, и неодинаковыми при разных положениях тестового импульса относительно помехи.

Чтобы получить усредненные психометрические кривые (рис. 4) для этих слушателей, были использованы данные, полученные при  $T$  в 120 мс (рис. 3). По усредненным данным (рис. 4 и табл. 2) сдвиги  $SI_O$  и  $SdI_D$ , полученные при разных положе-



**Рис. 5.** Фрагменты звуковых комплексов, состоящие из тестовых (закрашены серым цветом) и помеховых импульсов (закрашены белым цветом).

**Обозначения:** Пунктиром показано развитие во времени процесса маскировки при обнаружении (I) и распознавании (II) громкости тестового импульса. Представлены данные слушателей с нормальным слухом (три верхние строки) и нарушениями слуха (последняя строка). Помеха следовала за тестовым импульсом (слева) или опережала его (справа). Период следования  $T$  был равен задержке  $D$  ( $T = D$ ) и составлял 25, 50, 80 мс и 120 мс. Остальные обозначения – те же, что на рис. 1. А – данные, полученные для слушателей с нормальным слухом и  $T_{\min} = 25$  мс; Б – данные полученные для слушателей с нейросенсорной тугоухостью и  $T_{\min} \sim 80\text{--}150$  мс.

**Fig. 5.** Fragments of sound complexes consisting of test (gray) and masking (white) pulses.

**Designations:** The dashed line shows temporal unfolding of the masking process during detection (I) and recognition (II) of the test pulse loudness. Presented are the data for listeners with normal hearing (three upper lines) and age-related hearing loss (last line). The masker followed (left) or preceded (right) the test pulse. The repetition period of masking pulses,  $T$ , was equal to the test pulse delay relative to the masking pulse train,  $D$ , ( $T = D$ ). Other designations are the same as in Fig. 1. A – data for listeners with normal hearing and  $T_{\min} = 25$  ms; B – data for listeners with sensorineural hearing loss and  $T_{\min} \sim 80\text{--}150$  ms.

ниях тестового импульса, варьировали от 1 до 7 дБ. Однако достоверность значений сдвигов оценить сложно из-за тех трудностей, которые испытывали слушатели С3 и С4 при обнаружении тестовых импульсов, а также из-за отсутствия данных при других периодах  $T$ . Есть основания полагать, что уменьшение сдвигов  $SI_O$  и  $SdI_D$  у слушателей с НСТ, по сравнению со слушателями с нормальным слухом, было вызвано снижением временного разрешения громкости тестовых импульсов ( $T_{\min} \sim 80\text{--}150$  мс против  $T_{\min} \sim 25$  мс).

При больших  $T$  ( $T \gg T_{\min}$ ) диапазон интенсивностей  $R$ , в котором слушатели с НСТ могли обнаружить громкость тестового импульса, составил примерно 30 дБ (рис. 1, рис. 4, табл. 2). При периоде  $T$  в 120 мс диапазон  $R$  уменьшился до  $\sim 17\text{--}23$  дБ.

Рисунок 5 визуализирует данные табл. 2. Зависимые от периода следования тестовых импульсов изменения *пороговой* и *надпороговой* маскировки громкости (при  $D = T$ ) показаны пунктирными линиями. Кривая I характеризует изменения *порого-*

*вой* маскировки, а кривая II – *надпороговой* маскировки. У слушателей с нормальным слухом кривые I и II были построены на основании значений показателей маскировки, полученных при периодах  $T$ , равных 25, 50 и 80 мс. У слушателей с НСТ показатели маскировки были определены при  $T$  в 120 мс. Поэтому кривые I и II этих слушателей весьма условно оценивают изменения маскировки при изменении  $T$ .

У слушателей с нормальным слухом (рис. 5) была обнаружена зависимость от периода  $T$  *пороговой* и *надпороговой* маскировки громкости, когда тестовый импульс опережал помеху, но только *пороговая* маскировка громкости, когда тестовый импульс следовал за помехой. Вместе с этим рис. 5 наглядно показывает изменения диапазона  $R$ , в котором слушатели могли услышать тестовый импульс.

Таким образом, при  $Is < Im$  маскировка громкости тестовых импульсов была связана с периодом  $T$ , со слуховой чувствительностью слушателей, их индивидуальными особенностями временного разрешения громкости тестовых импульсов.

В дополнительной серии измерений были получены кривые маскировки как зависимости порогов обнаружения тестовых импульсов от задержки  $D$  между ними и помехами (рис. 6). Помехами были последовательности импульсов и одиночный импульс. В профилях кривых маскировки мы искали проявления особенностей временного разрешения и маскировки громкости тестовых импульсов.

В измерениях участвовали три слушателя с нормальным слухом (С9, С8 и С2) и один слушатель с НСТ (С4). Пороги обнаружения измеряли адаптивным методом вынужденного выбора, в котором интенсивность тестового импульса  $I_s$  была изменяемым параметром. Периоды  $T$  были равны 40 и 50 мс у слушателей С9 и С8; 60 и 80 мс у слушателя С2; 80 и 100 мс у слушателя С4. Выбранные периоды следования импульсов помех  $T$  для слушателей с нормальным слухом превосходили порог временного разрешения  $T_{\min}$ , равный 25 мс, а для слушателя с НСТ были ниже порога временного разрешения  $T_{\min}$ , равного 120 мс. Как и в основной серии измерений, обнаружение тестового импульса было сложной задачей для слушателя С4. Поэтому число измерений порогов у этого слушателя было больше, чем у слушателей С9, С8 и С2.

Кривые маскировки, полученные при следовании помехи за тестовыми импульсами, представлены на рис. 6, слева. Если помехой была последовательность импульсов, то при увеличении задержки  $D$ , но при  $D < T$  у всех слушателей пороги обнаружения тестовых импульсов уменьшались. Это уменьшение порогов было похоже на таковое, когда помехой служил одиночный импульс. Слушатели могли обнаружить присутствие тестового импульса на основании различий субъективных качеств помехи и комплекса, связанных с задержкой  $D$ . По-видимому, такие качества учитывали спектральные различия помехи и комплекса, которые тем больше, чем меньше задержка  $D$ . В точке  $D = T$  (рис. 6, слева) пороги обнаружения тестовых импульсов, как правило, возрастали до значений, равных  $Im + dI_U$  (рис. 1). Это указывало на смену признака обнаружения тестовых импульсов. Мы полагали, что происходил переход от обнаружения тестового импульса на основании спектральных различий помехи и комплекса к обнаружению тестового импульса на основании его громкости. При увеличении задержки  $D$  сверх периода  $T$ , т.е. при  $D > T$  (рис. 6, справа), пороги обнаружения снижались. Вероятно, большинство слушателей могли обнаружить тестовый импульс путем сравнения временных различий помехи и комплекса, связанных с задержкой  $D$ .

Кривые маскировки, полученные при следовании тестового импульса за помехой, представлены на рис. 6, справа. У слушателей С9, С8 и С2 с нормальным слухом кривые маскировки были схожими при наличии помех разных видов. Пороги обнаружения

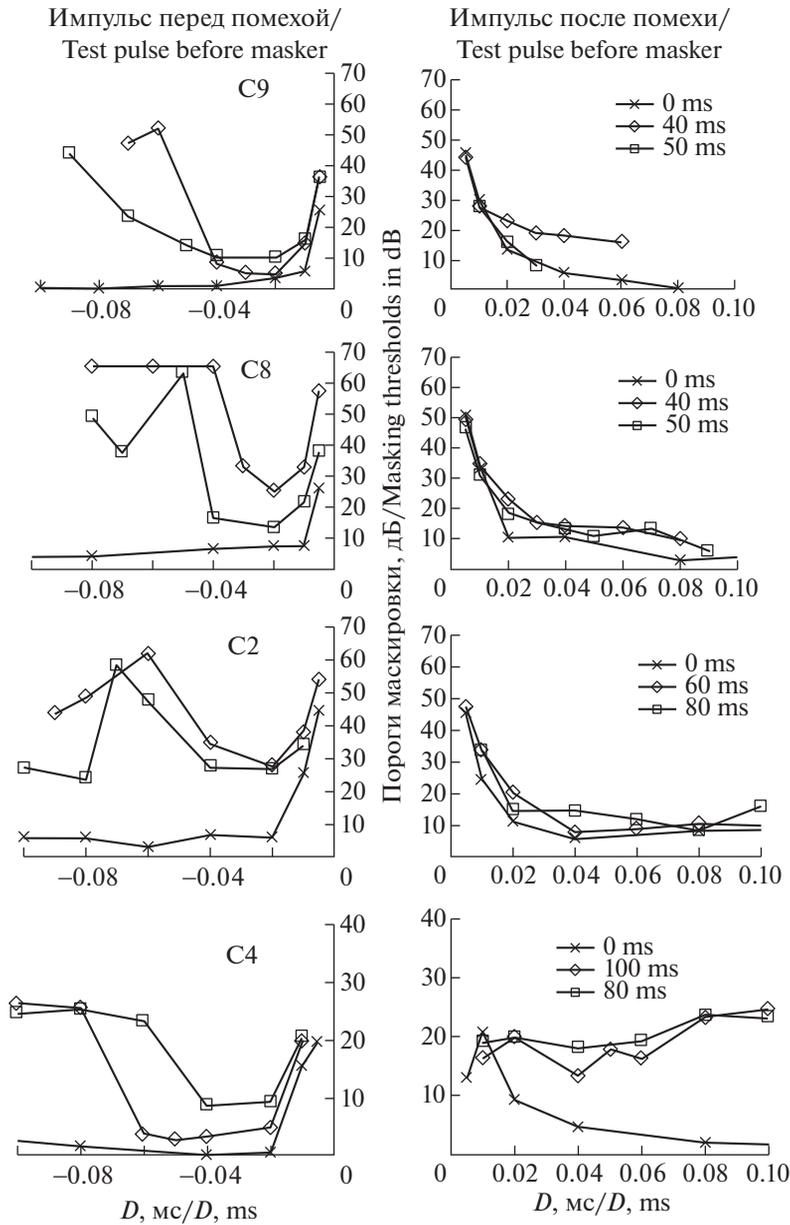
тестовых импульсов снижались с ростом задержки  $D$ . При использовании периодических помех снижение порогов можно объяснить использованием адаптивного метода их изменений, в котором приращения и понижения интенсивности тестового импульса  $I_s$  превышали пороговые инкременты и декременты  $dI_U$  и  $dI_D$  (рис. 1), а также тем, что периоды  $T$  помеховых импульсов были больше  $T_{\min}$  (25 мс). У слушателя С4 с НСТ кривые маскировки были разными при наличии помех разных видов. При наличии одиночных помеховых импульсов пороги обнаружения снижались с ростом задержки  $D$ . Однако пороги обнаружения тестовых импульсов, предъявляемых на фоне помеховых импульсов, были высокими, равными  $Im + dI_U$ , при любых  $D$  (рис. 1), так как выбранные периоды следования помеховых импульсов  $T$  были меньше  $T_{\min}$ .

Таким образом, индивидуальные особенности временного разрешения и маскировки громкости тестовых импульсов проявились в кривых маскировки или зависимостях порогов обнаружения тестового импульса от задержки  $D$  (рис. 6). Это указывало на информационную значимость показателей  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  и  $SdI_D$ , характеризующих временное разрешение и маскировку громкости тестовых импульсов.

## ОБСУЖДЕНИЕ

У слушателей с разной слуховой чувствительностью мы оценили временное разрешение и маскировку громкости тестовых импульсов. За порог временного разрешения громкости был принят минимальный период следования последовательности помеховых импульсов, при котором слушатель мог обнаружить громкость тестового импульса ( $D = T$ ).

Сопоставим полученные нами данные с известными данными по временному разрешению. Существуют разные подходы к оценке временного разрешения. Один из них предполагал измерение временной модуляционной передаточной функцией или зависимости порогов обнаружения амплитудной модуляции тонального или шумового сигнала от частоты модуляции. У слушателей с нормальным слухом самые низкие и примерно постоянные пороги обнаружения амплитудной модуляции шума были обнаружены на частотах модуляций, меньших 30–50 Гц [17, 18]. Считается, что при таких частотах слуховая система анализирует амплитудные изменения звуков во времени. С ростом частоты модуляции выше 50 Гц чувствительность к модуляциям падает. Профиль временной модуляционной передаточной функции (temporal modulation transfer function) мало зависит от уровня шумовой несущей. Слушатели со слуховыми потерями менее чувствительны к амплитудным



**Рис. 6.** Кривые маскировки или зависимости порогов обнаружения тестовых импульсов, предъявляемых до (слева) и после (справа) помех, от задержки  $D$  между импульсом и помехой.

**Обозначения:** Помехой был одиночный импульс или последовательность из 8 импульсов с периодом следования  $T$ ,  $T \neq D$ . Интенсивность помеховых импульсов 60 дБ УЗД. Абсцисс – задержка  $D$ , мс. Ординат – пороги маскировки как разности порогов обнаружения тестовых импульсов, предъявляемых до или после помех и в тишине, в дБ. Легенда – период следования импульсов помехи  $T$  в мс; при  $T = 0$  мс помехой был одиночный импульс.

**Fig. 6.** Masking curves or dependences of the test pulse detection thresholds presented before (left) and after (right) masker on the delay  $D$  between the pulse and the masker.

**Designations:** The masker was a single pulse or a train of 8 masking pulses and the repetition period  $T \neq D$ . Masking pulse intensity was 60 dB SPL. Abscissa – delay  $D$ , ms. Ordinate – masking thresholds as the difference between the detection thresholds of test pulses presented before or after masker and in silence, dB. Legend – the repetition period of masking pulses  $T$ , ms; at  $T = 0$  ms, the masker was a single pulse.

модуляциям, чем слушатели с нормальным слухом. Полученные нами пороги временного разрешения громкости тестовых импульсов  $T_{min}$  в 25 мс у слушателей с нормальным слухом и в 80–150 мс у слу-

шателей с НСТ вполне соответствуют указанным выше данным.

Наряду с временным разрешением громкости мы оценили *пороговую* и *надпороговую* маскировку

громкости тестовых импульсов ( $SI_0$  и  $SdI_D$ ), следующих до или после последовательностей помеховых импульсов.

Считается, что громкость широкополосных сигналов формируется путем суммирования частичных громкостей на выходах разных слуховых каналов. Формирование громкости узкополосных звуков в одиночном канале находится под влиянием временных процессов, среди которых временная суммация и адаптация занимают существенное место.

Рассмотрим известные данные по слуховой временной суммации. Изучение пороговой временной суммации тонов показало [19, 20], что у слушателей с нормальным слухом пороги обнаружения снижаются примерно на 3 дБ при удвоении длительности тонов, не превышающей  $\sim 300$  мс. У слушателей со слуховыми потерями это снижение, как правило, меньше [21, 22]. Пороговая суммация последовательностей импульсов слабее, чем суммация тонов. Она зависит от длительности и периода следования импульсов. При уменьшении периода следования  $T$  от 250 до 10 мс пороги обнаружения последовательностей импульсов повышаются на  $\sim 4$  дБ у слушателей с нормальным слухом, но остаются примерно постоянными у слушателей со слуховыми потерями [23, 24].

Свойства надпороговой временной суммации оценивали разностью интенсивностей равно громких тона длительностью 200 мс и тонального импульса длительностью 5 мс с частотами в 1 кГц [25]. Разность имела наибольшее значение при средних интенсивностях импульсов ( $\sim 40$ – $60$  дБ УЗД) и на  $10$ – $15$  дБ превышала разности, полученные при низких и высоких интенсивностях импульсов ( $\sim 20$  и  $\sim 100$  дБ УЗД).

Громкость последовательностей импульсов, имеющих надпороговые интенсивности, зависела от длительности и периода следования этих импульсов [26], т.е. от скважности импульсов. Чем меньше длительность, тем больше менялась громкость последовательности импульсов при изменении периода следования  $T$  последних. Однако увеличение периода  $T$  от 20 до 100 мс приводило к повышению громкость последовательности всего на 4 дБ.

Из вышесказанного следует, что *пороговую и надпороговую* маскировку громкости тестовых импульсов, достигающую  $12$ – $23$  дБ при  $T$  в 25 мс, сложно объяснить эффектами временной суммации тонов или последовательностей импульсов. Такую маскировку, по-видимому, можно объяснить особенностями формирования громкости коротких звуков [25], а также тот факт, что для оценки громкости начало звука важнее, чем более поздние его временные фрагменты [27].

Как было указано во введении, ощущение громкости тестовых импульсов могло меняться в при-

сутствии помех. Если тестовый импульс следовал за помехой, то регистрировали эффект названный “вызванным снижением громкости” импульса [7]. Он проявлялся сильнее, если помехи имели надпороговые интенсивности. Причиной эффекта могла быть слуховая адаптация. Если тестовый импульс опережал помеху, то регистрировали эффект, названный “частичной маскировкой громкости” импульса [3]. Такую маскировку объясняли сокращением времени формирования громкости импульса за счет появления помехи, по-видимому, полагая участие эффектов суммации в формировании громкости. Однако помимо снижения громкости импульсов при маскировке, мог возникать противоположный эффект – повышение громкости импульсов. Громкость второго импульса в паре могла превысить громкость одиночного импульса, даже если импульсы пары полностью разрешались слушателями во времени [28, 29]. Эффект возникал, когда интенсивность первого импульса была больше интенсивности второго на  $20$ – $40$  дБ, а задержки между импульсами в паре были меньше  $200$ – $400$  мс. Обнаруженный эффект отличался от эффекта пороговой временной суммации громкости тонов и был назван “повышением громкости” (“loudness enhancement”) импульсов. В более поздних исследованиях повышение громкости обнаружили не только при следовании тестового импульса за помехой [30, 31], но и при следовании помехи за тестовым импульсом [32, 33]. Наибольшее повышение громкости регистрировали в диапазоне средних интенсивностей тестовых импульсов.

В работах [34, 35] предложена гипотеза об участии в формировании ощущения громкости коротких звуков двух нейрональных компонентов. Гипотезу подтверждали результатами моделирования реакций ансамбля периферических волокон, вызванных на однократное предъявление одиночного или пары импульсов. Реакцию ансамбля волокон представляли в виде двух комплементарных распределений: распределения вероятности появления спайков во времени и распределение межспайковых интервалов, принимая их за основу комплементарных компонентов громкости. Учитывая это, полагали, что громкость одиночного формировали два компонента громкости – “базовый” и “комплементарный”. Основой “базового” компонента могло быть суммарное число спайков, сгенерированных ансамблем волокон слухового нерва, а основой “комплементарного” компонента – суммарное число межспайковых интервалов, соизмеримых с длительностью импульсов. Пара импульсов могла иметь два “базовых” компонента громкости каждого из импульсов, но только один “комплементарный” компонент громкости пары. В зависимости от параметров импульсов пары “комплементарный” компонент мог дополнить “базовый” компонент громкости либо первого, либо второго импульса в паре. Поэтому громкость первого или

второго импульса могла быть выше [27–30, 32] или ниже [3–7] громкости одиночного импульса, всегда имеющей два компонента громкости.

Учитывая перечисленные выше особенности маскировки и формирования громкости импульсов, можно объяснить полученные нами данные для слушателей с нормальным слухом. Кривые I и II на рис. 5 визуализируют изменения *пороговой* и *надпороговой* маскировки громкости при изменении периода следования импульсов помех. Если помеха следовала за тестовым импульсом, то причины *пороговой* маскировки громкости тестового импульса (кривая I на рис. 5) могли совпасть с причинами эффекта “частичной маскировки громкости” [3], основой которого был процесс суммации. Если тестовый импульс следовал за помехой, то причины *пороговой* маскировки громкости (кривая II на рис. 5) могли совпасть с причинами эффекта “вызванного снижения громкости” тестовых звуков [7], обусловленного, в большей степени, адаптацией, а не суммацией.

Кривая II на рис. 5 характеризовала изменения *надпороговой* маскировки громкости при изменении периода следования помеховых импульсов, когда тестовый импульс опережал помеху. *Надпороговая* маскировка достигала 18 дБ на пороге временного разрешения и могла быть следствием эффекта повышения громкости (“loudness enhancement”) тестового импульса [27–32]. При  $I_s \sim I_m$  диапазон интенсивностей, в котором громкость замаскированного тестового импульса была сопоставимой с громкостью помеховых импульсов, мог быть шире диапазона, в котором были сходными громкости одиночных тестового и помехового импульсов. Если тестовый импульс следовал за помехой, то *надпороговая* маскировка громкости тестовых импульсов отсутствовала (кривая II на рис. 5). По-видимому, слуховая адаптация, вызванная последовательностью помеховых импульсов, способствовала снижению громкостей тестового импульса и помеховых импульсов [7] и создавала условия распознавания, сходные с распознаванием интенсивности одиночных импульсов.

У слушателей с НСТ кривые I и II (табл. 2 и рис. 5) были построены на основании данных, полученных при  $T$  в 120 мс. Из-за ухудшения временного разрешения громкости тестовых импульсов *пороговая* и *надпороговая* маскировки громкости у этих слушателей были заметно меньше, чем у слушателей с нормальным слухом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена поиску показателей временной обработки, ответственных за восприятия темпа периодических звуков, в том числе речевых звуков. Анализировали такой аспект восприятия темпа, как временное разрешение громкости и

маскировку громкости отдельных импульсов периодических последовательностей. Для этого искали условия, в которых субъективным качеством обнаружения тестовых импульсов, предъявляемых до или после последовательностей импульсов, была их громкость. Определяли показатели временного разрешения громкости и маскировки громкости тестовых импульсов. Выявляли общие закономерности изменений показателей маскировки у слушателей с разной слуховой чувствительностью.

Были найдены условия, в которых слушатели обнаруживали тестовый импульс на основании его громкости. Помехой была длинная последовательность импульсов. Центральные частоты и частотные полосы тестовых и помеховых импульсов были одинаковыми. Задержка тестового импульса  $D$  относительно помехи была равна периоду следования помеховых импульсов  $T$ . Варьируемыми параметрами были период  $T$  и интенсивность тестового импульса  $I_s$ . В ходе измерений получали психометрические кривые как зависимости вероятности обнаружения тестового импульса от его интенсивности при разных периодах  $T$  ( $T = D$ ).

За порог временного разрешения громкости тестовых импульсов принимали минимальный период  $T_{\min}$ , при котором слушатель мог обнаружить тестовый импульс. При условии, что  $I_s \ll I_m$ , оценивали *пороговую* маскировку громкости, характеризуемую сдвигом  $SI_0$  порога обнаружения тестового импульса, предъявляемого до или после последовательности, относительного порога обнаружения одиночного импульса. При условии, что  $I_s \sim I_m$ , оценивали *надпороговую* маскировку громкости, характеризуемую сдвигом  $SdI_D$  порогового декремента  $dI_D$  интенсивности замаскированного импульса относительно порогового декремента  $dI$  интенсивности одиночного импульса. У молодых слушателей с нормальным слухом наибольшие сдвиги  $SI_0$  и  $SdI_D$  в 12–23 регистрировали на пороге временного разрешения громкости при  $T_{\min}$  в 25 мс. У пожилых слушателей с НСТ на пороге временного разрешения громкости при  $T_{\min}$  в 120 мс сдвиги  $SI_0$  и  $SdI_D$  были заметно меньше, т.е. 1–7 дБ.

Различия сдвигов  $SI_0$  и  $SdI_D$ , полученные у слушателей с нормальным слухом, при разных положениях тестового импульса относительно помехи указывали на различия причин, вызывающих *пороговую* и *надпороговую* маскировку громкости тестового импульса. *Пороговая* и *надпороговая* маскировки громкости были связаны со свойствами временного разрешения тестовых импульсов. За *пороговую* маскировку громкости могла отвечать временная суммация, если помеха следовала за тестовым импульсом, но преимущественно нейронная адаптация, если тестовый импульс следовал за помехой.

*Надпороговая* маскировка громкости имела место, только если тестовый импульс опережал помеху. Причиной такой маскировки мог быть эффект повышения громкости, расширяющий диапазон интенсивностей  $I_s$ , в котором тестовый и помеховые импульсы были не различимы. Если тестовый импульс следовал за помехой, то *надпороговую* маскировку громкости не регистрировали. Вероятно, слуховая адаптация препятствовала появлению эффекта повышения громкости.

На информационную значимость показателей временного разрешения громкости  $T_{\min}$  и маскировки громкости  $SI_O$  и  $SdI_D$  указывали их проявления в профилях зависимостей порогов обнаружения тестовых импульсов от их задержки  $D$  относительно помеховых импульсов при  $T \neq D$ .

Хотя данные, полученные у слушателей с НСТ, немногочисленны, они позволяют сделать важные выводы. По сравнению со слушателями с нормальным слухом у слушателей с НСТ ухудшение слуховой чувствительности сопровождалось заметным ухудшением временного разрешения громкости тестовых импульсов (120 мс против 25 мс), но незначительным снижением *пороговой* и *надпороговой* громкости импульсов вблизи порога  $T_{\min}$  (1–7 дБ против 12–23 дБ). Ухудшение временного разрешения слабо влияло на кривые маскировки, полученные при варьировании задержки  $D$  и при  $T \neq D$ , когда помехой был одиночный импульс, но заметно влияло на такие кривые, когда помехой была последовательность импульсов с периодом  $T \ll T_{\min}$ . По-видимому, именно ухудшение временного разрешения громкости импульсов вызывало ухудшение разборчивости быстрой речи у слушателя С4.

Таким образом, показатели  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  и  $SdI_D$  наряду со слуховой чувствительностью слушателей могут выявлять общие и индивидуальные особенности восприятия периодических звуков, в том числе согласных звуков речи, быть полезными для понимания причин нарушений восприятия быстрой речи у взрослых.

Психоакустические исследования были выполнены в соответствии с Хельсинкской декларацией 1964 г. и последующими ее изменениями.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят Александра Яковлевича Супина за полезные замечания, высказанные в ходе обсуждения работы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 14-04-00155 и № 17-04-00096.

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Л.К. Римская-Корсакова – планирование эксперимента, сбор данных, обработка данных, написание и редактирование рукописи; Д.И. Нечаев – сбор данных, обработка данных, обсуждение результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лингвистический энциклопедический словарь (ЛЭС). Гл. ред. В.Н. Ярцев. М.: Советская энциклопедия. 688 с. 1990 [Lingvisticheskiy entsiklopedicheskiy slovar' (LES). Gl. red. V.N. Yartsev. M.: Sovetskaya entsiklopediya. 688 s. 1990. (In Russ)].
2. Scharf B. Partial masking. *Acustica*. 1964. 14 (1): 16–23.
3. Fastl H. Temporal partial masking of pure tones by broadband noise: Experimental result and models. *Acta Acustica united with Acustica*. 54 (1): 145–153. 1984.
4. Fastl H., Zwicker E. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer. 480 p. 2007.
5. Mapes-Riordan D., Yost W.A. Loudness recalibration as a function of level. *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (6): 3506. 1999. <https://doi.org/10.1121/1.428203>
6. Arieh Y., Kelly K., Marks L.E. Tracking the time to recovery after induced loudness reduction (L). *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (6): 3381–3384. 2005. <https://doi.org/10.1121/1.2202867>
7. Epstein M. An introduction to induced loudness reduction. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (3): EL74–80. 2007. <https://doi.org/10.1121/1.2761922>
8. Fitzgibbons P.J., Gordon-Salant S. Age-related differences in discrimination of temporal intervals in accented tone sequences. *Hearing Research*. 264 (1–2): 41–47. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.11.008>
9. Fitzgibbons P.J., Gordon-Salant S. Age effects in discrimination of repeating sequence intervals. *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (3): 1490–1500. 2011. <https://doi.org/10.1121/1.3533728>
10. Римская-Корсакова Л.К., Нечаев Д.И. Изменения пороговой громкости первого или последнего импульса последовательности у слушателей с нормальным слухом и слуховыми потерями. *Сенсорные системы*. 34 (2): 117–130. 2020. [Rimskaya-Korsakova L.K., Nechaev D.I. Threshold loudness' changes for the first and last pulse in sequence in listeners with normal hearing and hearing losses. *Sensornie sistemy*. 34 (2): 117–130. 2020. (In Russ)]. <https://doi.org/10.31857/S0235009220020092>
11. Альтман Я.А. *Слуховая система*. Издательство: Л.: Наука. 620 с. 1990. [Altman Ya.A. *Slukhovaya sistema*. Izdatel'stvo: L.: Nauka. 620 s. 1990. (in Russ)].
12. Moore B.C.J. *An introduction to the psychology of hearing*. Academic Press, 413 p. 1997.
13. Oxenham A.J. Forward masking: adaptation or integration. *J. Acoust. Soc. Am.* 109 (2): 732–741. 2001. <https://doi.org/10.1121/1.1336501>
14. Elliott L.L. Backward and forward masking. *Audiology*. 1971. 10 (2): 65–76.
15. Римская-Корсакова Л.К. Периферическое кодирование и слуховое распознавание изменений уровней коротких высокочастотных стимулов, предъявляе-

- мых после маскеров. Сенсорные системы. 25 (4): 305–318. 2011. [*Rimskaya-Korsakova L.K.* Peripheral Coding and Discrimination of Level Changes of Short High-Frequency Stimulus Under Forward Masking. 25 (4): 305–318. 2011. Sensornie sistemy. (In Russ)].
16. *Римская-Корсакова Л.К., Нечитаева Ю.В., Пушкина Н.А.* Распознавание изменений уровней высоко-частотных импульсов при маскировке: влияние слухового анализа временной структуры звуковых комплексов “маскер – импульс”. Сенсорные системы. 27 (2): 171–182. 2013. [*Rimskaya-Korsakova L.K., Nechitaeva Y.V., Pushkina N.A.* Discrimination of changes in the levels of high-frequency pulses under masking: auditory analysis changing in the temporal envelope of the “Complicated masker – pulse” sound complex. Sensornie sistemy. 27 (2): 171–182. 2013. (In Russ)].
  17. *Viemeister N.F.* Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds. *J. Acoust. Soc. Am.* 66 (5): 1364–1380. 1979. <https://doi.org/10.1121/1.383531>
  18. *Bacon S.P., Viemeister N.F.* Temporal modulation transfer functions in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Audiology.* 24 (1): 117–134. 1985. <https://doi.org/10.3109/00206098509081545>
  19. *Plomp R., Bouman M.A.* Relation between hearing threshold and duration for tone pulses. *J. Acoust. Soc. Am.* 31 (1): 749–758. 1959.
  20. *Zwislocki J.J.* Theory of temporal auditory summation. *J. Acoust. Soc. Am.* 32 (1): 1046–1060. 1960. <https://doi.org/10.1121/1.1908276>
  21. *Elliott L.L.* Temporal and masking phenomena in persons with sensorineural hearing loss. *Audiology.* 14 (4): 336–353. 1975.
  22. *Florentine M., Fastl H., Buus S.* Temporal integration in normal hearing, cochlear impairment, and impairment simulated by masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 84 (1): 195–203. 1988. <https://doi.org/10.1121/1.396964>
  23. *Garner W.R.* Auditory thresholds of short tones as a function of repetition rates. *J. Acoust. Soc. Am.* 19 (4): 600–608. 1947. <https://doi.org/10.1121/1.1916527>
  24. *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.* 87 (1): 260–268. 1990. <https://doi.org/10.1121/1.399293>
  25. *Florentine M., Buus S., Poulsen T.* Temporal integration of loudness as a function of level. *J. Acoust. Soc. Am.* 99 (3): 1633–1644. 1996.
  26. *Garner W.R.* The loudness of repeated short tones. *J. Acoust. Soc. Am.* 20 (3): 513–527. 1948. <https://doi.org/10.1121/1.1906405>
  27. *Oberfeld D., Hots J., Verhey J.L.* Temporal weights in the perception of sound intensity: Effects of sound duration and number of temporal segments. *J. Acoust. Soc. Am.* 143 (2): 943–953. 2018. <https://doi.org/10.1121/1.5023686>
  28. *Irwin R.J., Zwisklocki J.J.* Loudness effects in pairs of tone bursts. *Percept Psychophys.* 10 (1): 189–192. 1971.
  29. *Galambos R., Bauer J., Picton T., Squires K., Squires N.* Loudness enhancement following contralateral stimulation. *J. Acoust. Soc. Am.* 52 (4): 1127–1130. 1972. <https://doi.org/10.1121/1.1913224>
  30. *Zeng F.-G.* Loudness growth in forward masking: Relation to intensity discrimination. *J. Acoust. Soc. Am.* 96 (4): 2127–2132. 1994. <https://doi.org/10.1121/1.410154>
  31. *Oberfeld D.* The mid-difference hump in forward-masked intensity discrimination. *J. Acoust. Soc. Am.* 123 (3): 1574–1581. 2008. <https://doi.org/10.1121/1.2837284>
  32. *Plack C.J., Viemeister N.F.* Intensity discrimination under backward masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 92 (6): 3097–3101. 1992b.
  33. *Plack C.J.* Loudness enhancement and intensity discrimination under forward and backward masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 100 (2 Pt 1): 1024–1030. 1996.
  34. *Rimskaya-Korsakova L.K.* Manifestation of peripheral coding in the effect of the loudness enhancement and intensity discrimination of tone bursts presented before and after tone burst noise. *Acoustical Physics.* 63 (4): 478–489. 2017. <https://doi.org/10.1134/S1063771017040121>
  35. *Rimskaya-Korsakova L.* Pulse coding in the ensemble of peripheral fibres and auditory discrimination of the tone burst intensity. Proc. 23rd International Congress on Acoustics, ICA 2019, Germany, 9–13 Sep. 2019. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001090.pdf>

## THRESHOLD AND SUPRA-THRESHOLD MASKING OF THE LOUDNESS OF TEST PULSES CAUSED BY PERIODIC PULSE TRAINS

L. K. Rimskaya-Korsakova<sup>a, #</sup> and D. I. Nechaev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> N.N. Andreyev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>b</sup> A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: lkrk@mail.ru

In order to search for indicators of temporal processing of periodic sounds, we studied the effect of the periodicity of a train of masking pulses on the temporal resolution and masking of the loudness of the test pulse, which was the first or the last in the train. Measurements were carried out on listeners with normal hearing and age-related sensorineural hearing loss. The test pulse delay  $D$  relative to the train was equal to the pulse repetition period  $T$  in the train ( $D = T$ ). The center frequencies and frequency bands of all pulses were 4 kHz and 240 Hz. Under such conditions, the basis for detecting test pulses was believed to be their loudness. The intensity of masking

pulses  $I_m$  was 80 dB SPL. The period  $T$  was varied within the range of 20–150 ms while the test pulse intensity  $I_s$  within the range of 0–85 dB. The temporal resolution of the pulse loudness was equal to the minimum period  $T_{\min}$ , at which the listener could detect a test pulse. *Threshold* masking of the test pulse loudness ( $I_s \ll I_m$ ) corresponded to the shift in the test pulse detection threshold,  $SI_O$ , obtained in the train presence relative to the threshold obtained in silence. If intensities of the masking and test pulses were equal, the latest pulse could not be detected, but the test pulse could be detected by increasing or decreasing its intensity. Thus, *supra-threshold* masking of the test pulse loudness ( $I_s \sim I_m$ ) was estimated by the shifts,  $SdI_U$  and  $SdI_D$ , in the threshold intensity decrement and increment of the masked test pulse relative to the threshold intensity increment of a single masking pulse. It was shown that it is only  $SI_O$  and  $SdI_D$  that were related to the temporal resolution of the test pulses loudness. These shifts depended both on the test pulse position relative to the train and auditory sensitivity of the listeners. The largest  $SI_O$  and  $SdI_D$  shifts were recorded at the temporal resolution threshold of the test pulse loudness, i.e. at  $T_{\min}$ . For listeners with normal hearing,  $T_{\min}$  was 25 ms, while  $SI_O$  and  $SdI_D$  shifts were 12 and 18 dB if the test pulse was ahead of the train and 23 and 0 dB if the test pulse followed the train. In listeners with age-related hearing loss, the  $T_{\min}$  period increased up to 80–150 ms. At  $T$  of 120 ms,  $SI_O$  and  $SdI_D$  shifts were 1 and 4 dB if the test pulse was ahead of the train and 4 and 7 dB if the test pulse followed the train. The informational significance of the  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  and  $SdI_D$  indicators was confirmed by their manifestations in the profiles of test pulse detection threshold dependences on the test pulse delay  $D$  ( $D \neq T$ ). The  $T_{\min}$ ,  $SI_O$  and  $SdI_D$  indicators could be the characteristics of the temporal perception of periodic sounds, including speech. The causes of threshold and supra-threshold masking of the test pulse loudness at different positions of the test pulse relative to the masking pulse train are discussed.

*Keywords:* pulses, masking pulse train, loudness changes, temporal resolution, masking, summation, adaptation