

СЛУХОВОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕЛЬФИНОМ ПАРЫ ИМПУЛЬСОВ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОМЕХИ

© 2004 г. М. Н. Сухорученко

Акустический институт Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: bvp@akiu.ru

Поступила в редакцию 10.02.2004 г.

Поведенческим методом у дельфина афалины (*Tursiops truncatus*) измерялись пороги слышимости одиночной пары равновеликих импульсов-щелчков при действии импульсной помехи. Помеха представляла серии пар одинаковых импульсов с задержкой между импульсами в парах  $\tau_n$ , и частотой повторения пар  $f_n$ . Между сериями в паузе  $R > 1/f_n$  помеха отсутствовала, но на один из двух каналов в случайном порядке подавалась пара тестовых импульсов. Серии имели длительность  $T$ , общий цикл стимуляции  $J = T + R$ . Исследовалась зависимость порогов обнаружения тестовой пары от задержки  $\tau_n$  при фиксированных значениях межимпульсного интервала в тестовой паре  $\tau_m = 50, 100, 200$  и  $500$  мкс. В предварительных измерениях, выполненных при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс, подбирались параметры помехи. Сдвиг порога при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс достигал 35 дБ над порогом слышимости тестовой пары в отсутствие помехи. По разные стороны от значения  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс пороги спадали с изменением  $\tau_n$  приблизительно до 20 дБ над порогом обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи. По мере тренировки, однако, пороговые кривые постепенно опускались, приближаясь к уровню обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи и при этом уплощались (избирательность к действию помехи исчезала). Уменьшение длительности паузы  $R$  привело к восстановлению зависимости порога обнаружения тестовой пары от  $\tau_n$ . При этом удалось получить статистически значимый максимум при  $\tau_n = \tau_m$  для  $\tau_n$  в пределах критического интервала (при  $\tau_m < 500$  мкс). За пределами критического интервала (при  $\tau_m > 500$  мкс) даже при самой малой длительности паузы ( $R = 15$  мс) зависимости порогов обнаружения тестовой пары от значения  $\tau_n$  получено не было.

## ВВЕДЕНИЕ

Маскировка тона тоном и тона шумом является классическим методом исследования слуха. В последние десятилетия в психоакустической литературе появились работы, в которых исследуется маскировка сигналов сложными естественными стимулами, например, речеподобными звуками. Маскировка чистых тонов стимулами с разнообразными сложными спектрами позволяет получить так называемый “слуховой спектр” таких маскеров.

Для дельфина естественной является импульсная помеха, имитирующая множественную реверберацию собственных зондирующих импульсов. Эхо от подводной мишени, вызванное отдельным зондирующим импульсом дельфина, часто представляет собой также последовательность нескольких импульсов (так называемых первичных и вторичных эхо) с коротким межимпульсным интервалом и различными пиковыми значениями [3, 4]. Обнаружение и различение импульсных последовательностей с очень коротким межимпульсным интервалом в условиях реальной эхолокации - сложная задача, которая удивительно легко решается дельфином. Возможность объяснения уникальных эхолокационных способ-

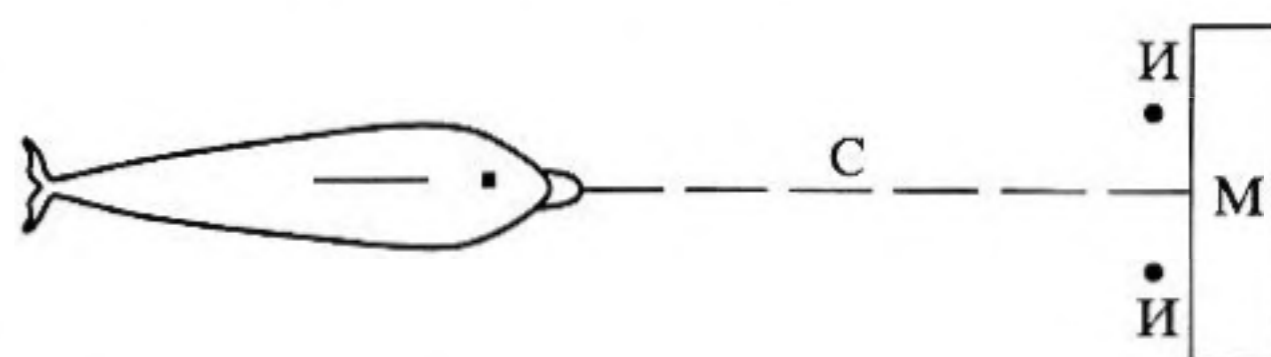
ностей дельфинов чувствительностью к высоте тона последовательности когерентных импульсов (time separation pitch TSP) давно обсуждается в литературе [5, 6].

Исследования [7, 8, 9] показали, что в области значений межимпульсного интервала 200–300 мкс находится некая граница, вблизи которой при различении пар импульсов меняется поведенческая реакция дельфина. При длительной работе с задержками менее 200–300 мкс дельфин перестает различать пары с задержкой в стандартной паре более 200–300 мкс. Кроме того, если при задержках до 200–300 мкс в качестве положительного сигнала ему служила пара импульсов с более длинным интервалом, то при увеличении длительности задержки в стандартной паре выше 200–300 мкс дельфин начинает систематически использовать в качестве положительного стимула пару с более коротким интервалом [8]. Изменения в поведенческих реакциях дельфина авторы объяснили тем, что в области значений задержки до 200–300 мкс пара импульсов воспринимается как единый слуховой образ, в то время как за пределами этого значения импульсы в паре воспринимаются дельфином как отдельные импульсы. Межимпульсный интервал 200–300 мкс был на-

зван критическим. Позднее методом суммарных вызванных потенциалов было показано, что в стволе мозга дельфина при интервалах в районе 200–300 мкс, действительно, начинают выделяться ответы на отдельные импульсы в паре [10]. Было выдвинуто предположение [6], что при интервалах, лежащих пределах критического дельфин чувствует высоту тона пары импульсов (time separation pitch TSP), определяемую обратным значением задержки в паре.

Действие импульсной помехи на пороги слышимости чистых тонов исследовалось в работе [11]. Зависимость порогов от частоты тестового сигнала имела довольно сложную форму, которую можно рассматривать как суперпозицию нескольких компонент: во-первых, сравнительно неглубокие осцилляции общей кривой пороговых сдвигов, точно коррелирующие с экстремумами спектра помехи, во-вторых – монотонно падающей компоненты с высоким максимумом на частоте  $1/\tau_n$  и, наконец, компоненты, не зависящей от тестовой частоты. Разные компоненты кривой маскировки связывались с разными слуховыми (субъективным) признаками импульсной помехи [11]. Первая компонента, отражающая распределение уровня нервного возбуждения по комплексу частотных каналов в соответствии с формой амплитудного спектра помехи, определяет тембральные свойства импульсной помехи. Особый интерес представляет вторая компонента, которую удается объяснить, только допустив, что импульсная последовательность имеет высоту тона на частоте  $1/\tau_n$ . Поэтому монотонно падающая компонента кривой маскирующего действия является результатом своеобразной маскировки чистого тона сложным тоном помехи. Первые две компоненты обусловлены периодичностью спектральной плотности пары импульсов. Последняя не обнаруживает признаков периодичности и соответствует слуховому признаку квазислучайного шума, в основе которого лежит спонтанная нервная активность, вызванная в разных частотных каналах импульсной помехой.

На дельфине афалине исследовалось действие импульсной помехи на различение тестовой пары и одиночного импульса [12]. Методом условно-рефлекторной дифференцировки пары и одиночного импульса измерялась пороги обнаружения второго импульса в тестовой паре при действии импульсной помехи. Показана ее избирательность к межимпульсному интервалу в парах, составляющих помеху. Пороговые кривые обнаруживают один очень выраженный максимум при совпадающих значениях задержки в тестовых парах и парах, составляющих помеху. Эта избирательность найдена для тестовых пар с задержкой в парах 20–200 мкс, т.е. в пределах критического интервала. За пределами критического интервала такой избирательности не наблюдалось. По-



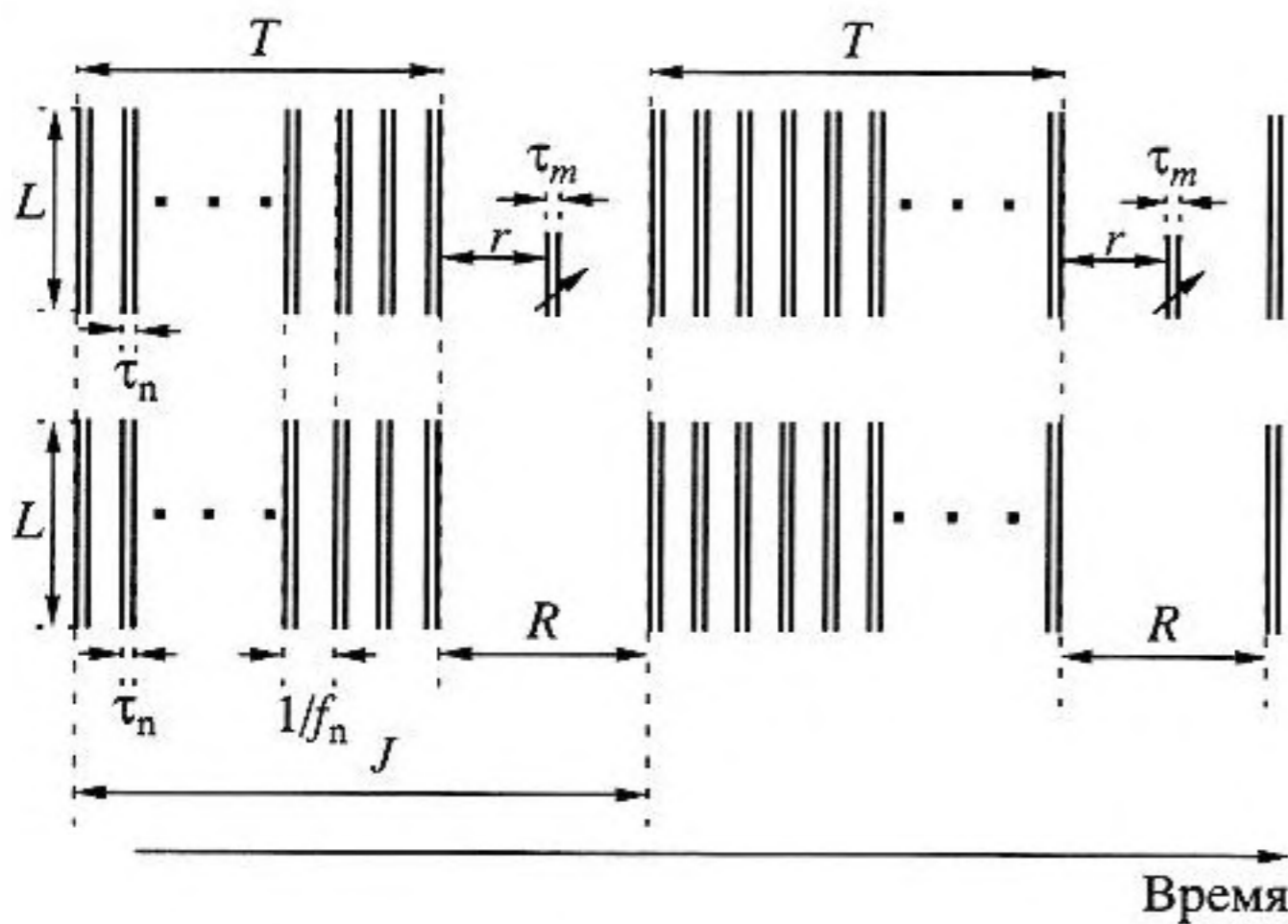
**Рис. 1.** Схема экспериментальной обстановки. Дельфин на стартовой позиции. С – разделительная сеть, И – акустические преобразователи, М – мостки, с которых производилось управление тестовым сигналом и пищевое вознаграждение животного.

видимому, эффект избирательности также определяется чувствительностью к высоте тона импульсной помехи.

В настоящей работе исследовалось действие помехи, состоящей из достаточно длительных серий пар одинаковых импульсов равновеликой амплитуды при обнаружении одиночной пары одинаковых равновеликих импульсов. Измерялись пороги обнаружения тестовой пары с фиксированным межимпульсным интервалом  $\tau_m = 50, 100, 200$  и  $500$  мкс в зависимости от  $\tau_n$  (длительности задержки в парах, составляющих помеху). Целью исследования было выяснить, можно ли получить эффект избирательности действия помехи при обнаружении пар импульсов равновеликой амплитуды, как это наблюдалось при различении пары и одиночного импульса [12].

## МЕТОДИКА

Работа поставлена на афалине *Tursiops truncatus*, взрослой самке, отловленной в открытом море за три месяца до начала ее дрессировки в закрытом бассейне. Схема экспериментальной обстановки приведена на рис. 1. К экспериментальным мосткам М одним концом крепилась разделительная сеть С. По разные стороны от сети на расстоянии 1 м и на глубину 1.5 м подвешивались пьезокерамические излучатели (и) диаметром 10 мм. Другой конец разделительной сети с помощью растяжек фиксировался на расстоянии 2 м от экспериментальных мостков. Вблизи дальнего конца разделительной сети вырабатывалась стартовая позиция животного. Стартовым сигналом служил тон частотой 60 кГц, подававшийся через третий излучатель, не показанный на рис. 1. На рис. 2 показана схема акустической стимуляции. Одна и та же помеха подавалась на оба излучателя одновременно с одного и того же генератора. Помеха представляла собой серии пар импульсов длительностью  $T$  с регулируемой длительностью межимпульсного интервала в паре  $\tau_n$ , при частоте повторения пар  $f_n$ . Между последовательными сериями пар импульсов помехи возникала пауза длительностью  $R > 1/f_n$ , на время которой помеха отключалась, но на одном из из-



**Рис. 2.** Временная диаграмма акустической стимуляции  $T$  – длительность одной серии пар импульсов помехи. Помеха – пары импульсов с задержкой в парах  $\tau_n$ , следующие с частотой повторения  $f_n$ .

Тестовый сигнал – одиночная пара импульсов с фиксированной задержкой в паре  $t_m$  – подается в случайном порядке на одном из двух каналов в паузе  $R > 1/f_n$  с временным сдвигом  $r$  относительно начала паузы. Общий цикл стимуляции  $J = T + R$ .  $L$  – пиковое значение импульсов помехи. Масштаб времени и амплитуды – условный.



**Рис. 3.** Спектрограммы импульсов, зарегистрированных в воде с разных излучателей (пунктир) в ответ на один и тот же электрический импульс. Сплошная линия – усредненная спектрограмма для обоих излучателей.

лучателей (в случайном порядке) в момент  $t$  могла появиться тестовая пара импульсов с фиксированной задержкой в паре  $\tau_m$  и регулируемой амплитудой импульсов. Общий цикл стимуляции составлял  $J = T + R$ , пиковое значение импульсов помехи обозначено на рис. 2 символом  $L$ .

Длительность одиночного акустического импульса в воде не превышала 30 мкс. На рис. 3 приведен спектр одиночных импульсов, зарегистрированных с разных излучателей в ответ на один и тот же электрический импульс, и усредненный

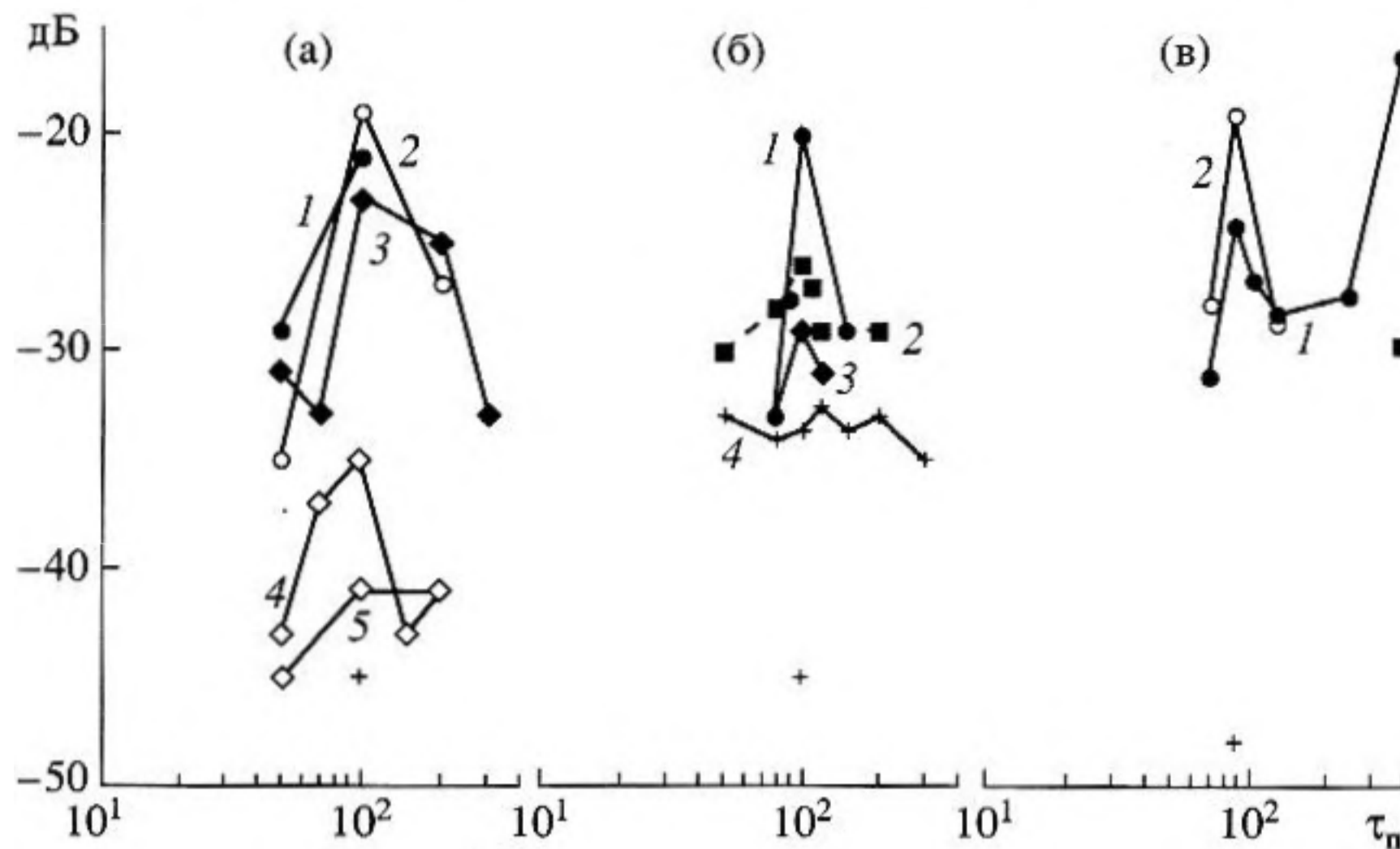
спектр. Последний рассчитывался путем преобразования Фурье осциллограмм импульсов.

С помощью пищевого подкрепления был выработан условно-рефлекторный подход животного к излучателю, на котором появлялась тестовая пара импульсов. Дрессировка и тренировка продолжались немногим более 2-х месяцев. Пороги определялись адаптивным способом (методом “лестницы”). Пиковое значение импульсов тестовой пары понижалось, начиная от заведомо надпорогового, на одну и ту же ступеньку (4 дБ) до первого неправильного подхода, после чего уровень повышался до нового правильного подхода и снова уменьшался до неправильного подхода и т.д. После грубого определения пороговой зоны шаг изменения уменьшился до 2 дБ, причем понижение уровня происходило только в случае, если в двух испытаниях подряд подходы были правильными. Если хотя бы один ответ из двух испытаний был неправильным, уровень повышался. Полученное таким образом пороговое значение соответствует 70.7% правильного обнаружения [13]. Для получения одного порогового значения число реверсий уровня во многих случаях достигало 20, но не менее 10. При этом общее число испытаний в области порога составляло 30–50. Пороговое значение получалось путем усреднения промежуточных между соседними “реверсиями” уровней. В одном опыте удавалось получить 2–3, в лучшем случае 4–5 пороговых значений.

В начальных опытах подбирались параметры помехи, которые в дальнейшем использовались в качестве фиксированных. Этими параметрами были: уровень ощущения импульсной помехи  $L$ , длительность  $T$  отдельных серий пар импульсов помехи, частота следования пар  $f_n$  и, наконец, длительность паузы между последовательными сериями пар импульсов помехи  $R$ . Подбор параметров помехи осуществлялся при  $\tau_n = \tau_m$ . Первоначально задачей было получить достаточно существенный сдвиг порога обнаружения тестовой пары при  $\tau_n = \tau_m$  относительно порога обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 показаны пороговые кривые для  $\tau_m = 100$  мкс. На рис. 4а приведены пороговые кривые, полученные при следующих параметрах помехи:  $J = 3/c$ ,  $1/f_n = 5$  мс,  $R = 10/f_n = 50$  мс,  $r = 5/f_n = 25$  мс,  $L \approx 25$  дБ над порогом слышимости помехи. Номера кривых показывают порядковый номер опыта (один опыт в день). Первые кривые (1–3) более или менее повторяют друг друга по форме и показывают единственный максимум при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс. По обе стороны от максимума пороги спадают с изменением  $\tau_n$  приблизительно до



**Рис. 4.** Пороги обнаружения тестовой пары с межимпульсным интервалом в паре  $\tau_n = 100$  мкс в условиях импульсной помехи на разных стадиях тренировки. Помеха-серии пар импульсов с задержкой в парах  $\tau_n$ , длительность серий  $T$ , интервалом между сериями  $R$ .

Параметры помехи для каждого из рис. а-в.

а)  $L = 25$  дБ,  $R = 50$  мс,  $r = 25$  мс,  $1/J = 3/c$ ,  $1/f_n = 5$  мс; б)  $L = 50$  дБ,  $R = 50$  мс,  $r = 25$  мс,  $1/J = 3/c$ ,  $1/f_n = 5$  мс; в)  $L = 50$  дБ,  $1/J = 1/c$ ,  $1/f_n = 1$  мс. 1.  $R = 30$  мс,  $r = 15$  мс. 2.  $R = 15$  мс,  $r = 5$  мс.

Номера кривых на крайнем левом рис. (а) совпадают с порядковым номером опытов. Кривые под номерами 1-3 на рис. 4б показывают средние пороги по каждой паре следующих друг за другом опытов, кривая 1 на рис. 4в - средняя по последним 5-и опытам из 18, выполненных при указанных к рис. 4в параметрах помехи, кривая 2 - данные одного опыта. Крестики внизу рис. 4 показывают уровень порога тестовой пары в отсутствие помехи. Дб по оси ординат представляют уровень порога обнаружения тестовой пары в условиях помехи над порогом ее ощущения в отсутствие помехи. По оси абсцисс приведены значения задержки в парах, составляющих помеху, в мкс. Для помехи в дБ обозначен УО.

20 дБ над порогом обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи. Высота максимума этих кривых достигает 10-15 дБ. В процессе тренировки, однако, пороговая кривая в целом опускается вниз по оси ординат, приближаясь к уровню обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи сначала без изменения формы (кривая 4), а затем исчезает зависимость порога от  $\tau_n$  (кривая 5).

Во всех последующих экспериментах пиковое значение импульсов помехи было увеличено на 25 дБ, т.е. до 50 дБ над порогом слышимости помехи. Рис. 4б показывает кривые обнаружения тестовой пары, которые получены на новом уровне помехи при неизменных остальных параметрах помехи на разных стадиях тренировки.

Кривые 1-3 на рис. 4б демонстрируют средние пороги по каждой очередной паре следующих друг за другом опытов в зависимости от межимпульсного интервала в парах импульсов помехи. Кривая 1 на рис. 4б вновь показывает максимум при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс. Он имеет приблизительно такую же высоту, как и кривые 1-3 на рис. 4а. Кривые 2 и 3 на рис. 4б обнаруживают постепенное уплощение и, наконец, кривая 4 на рис. 4б (средняя по последним 5-ти опытам в данной серии) вообще не проявляет зависимости пороговой кривой от  $\tau_n$ . В ходе опытов опять наблюдает-

ся постепенное сближение пороговых кривых к порогу обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи, что свидетельствует об определенном ослаблении эффективности помехи. Однако сближение кривых при уровне помехи 50 дБ приостановилось на том же уровне (приблизительно 20 дБ над порогом обнаружения пары в отсутствие помехи), на который приходится относительно порога в отсутствие действия помехи кривые 1-3 на рис. 4а, полученных при уровне помехи 25 дБ. Таким образом, значительное повышение уровня помехи не позволяет получить стабильную избирательность действия помехи на пороговое обнаружение пары импульсов равновеликого пикового значения.

Все последующие эксперименты были выполнены при  $J = 1/c$   $1/f_n = 1$  мс и  $L = 50$  дБ над порогом слышимости помехи. Изменялись только значения  $R$  и  $r$ . Кривая 1 на рис. 3в, получена при  $R = 30/f_n = 30$  мс,  $r = 25/f_n = 25$  мс (средняя по 18 опытам пороговая зависимость от  $\tau_n$ ). При указанных временных параметрах помехи удалось получить устойчивый максимум при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс, который сохранялся при длительной тренировке. Высота максимума кривой 1 не велика. Тем не менее, объем пороговых данных позволил получить очень высокий уровень статистической значимо-

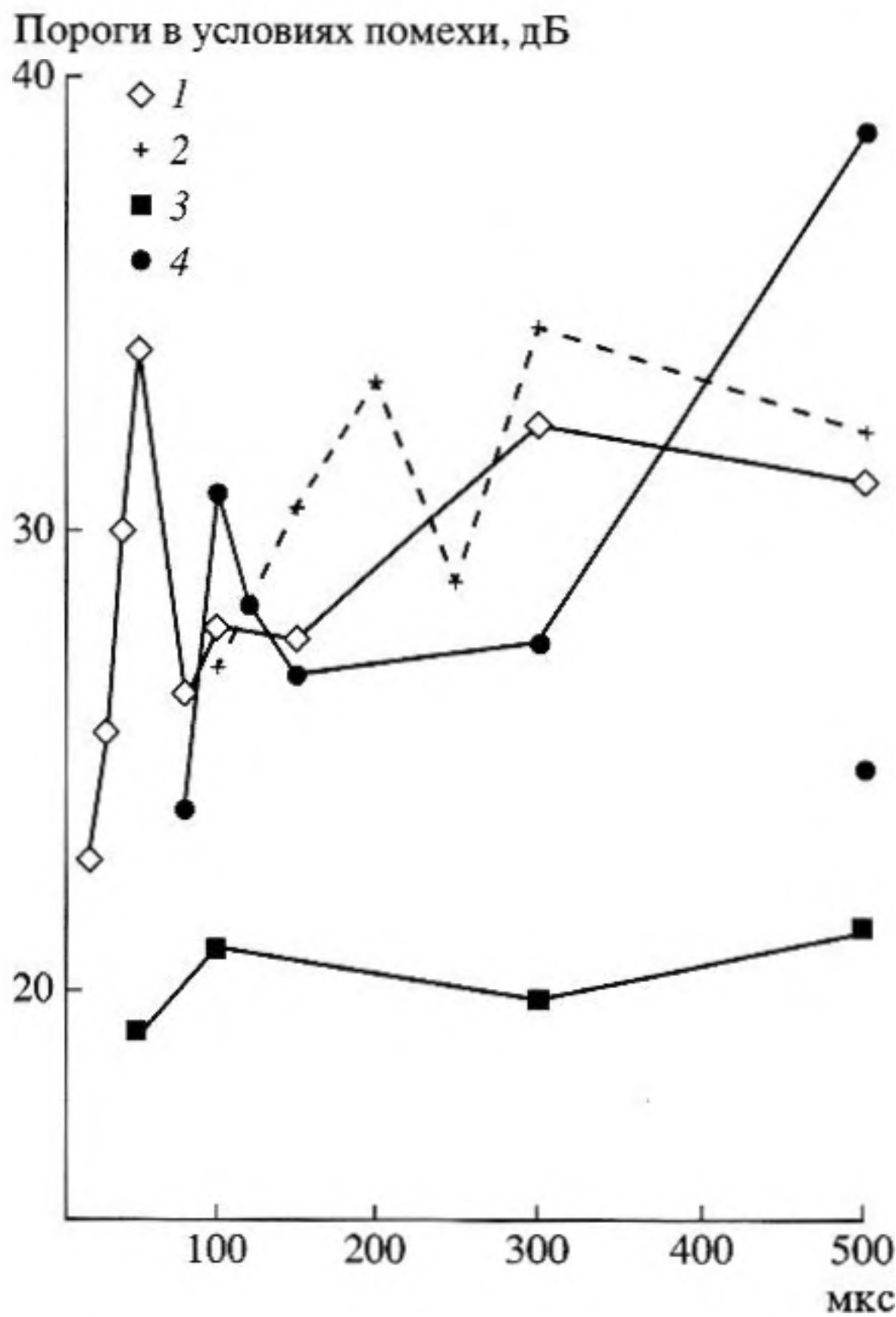


Рис. 5. Пороги обнаружения тестовой пары импульсов при действии помехи.

Помеха — серии пар импульсов с задержкой в парах  $\tau_n$ , длительность серий  $T$ , интервал между сериями  $R$  и частота следования пар импульсов помехи  $f_n$ . Параметры кривых — длительность задержки в тестовой паре  $\tau_m$  (значения указаны слева от рисунка). О дБ — порог обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи. По оси абсцисс приведены значения  $\tau_n$  (задержка в парах, составляющих помеху).

1 —  $\tau_m = 50$  мкс; 2 —  $\tau_m = 200$  мкс; 3 —  $\tau_m = 500$  мкс все при  $L = 50$  дБ;  $1/\tau = 1/c$ ;  $1/f_m = 1$  мс;  $R = 15$  мс;  $\gamma = 5$  мс.  
4 —  $\tau_m = 100$  мкс при  $L = 500$  дБ;  $1/\tau = 3/c$ ;  $1/f_m = 5$  мс;  $R = 30$  мс;  $\gamma = 15$  мс.

сти разницы средних порогов при  $\tau_n = 80$  мкс и  $\tau_n = 150$  мкс по сравнению с  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс: 99.9% и 90% соответственно (по Стьюденту [14]). Отсюда следует, что длительность паузы между последовательными сериями пар импульсов помехи имеет большее значение для выявления эффекта избирательности, чем уровень помехи. К сказанному о задержке  $\tau_m = 100$  мкс следует добавить, что при увеличении межимпульсного интервала в парах, составляющих помеху, за пределы критического интервала при  $\tau_n = 500$  мкс обнаружился очень высокий порог (рис. 4в, кривая 1). Однако по истечении всего цикла экспериментов при других тестовых задержках оказалось, что порог при  $\tau_n = 500$  мкс для  $\tau_m = 100$  мкс резко упал,

почти до уровня, полученного при  $\tau_n = 80$  мкс. На рис. 4в это значение отмечено номером 3. Кривая 2 на рис. 4в для  $\tau_m = 100$  мкс получена при параметрах помехи, выбранных в качестве окончательных:  $L = 50$  дБ,  $f_n = 1000/c$ ,  $J = 1/c$ ,  $R = 15/f_n = 15$  мс,  $r = 5/f_n = 5$  мс. Последняя кривая также обнаруживает максимум при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс, но проходит несколько выше кривой 1 (рис. 4в). Таким образом, измерения порогов обнаружения пары импульсов при  $\tau_m = 100$  мкс показали, что избирательность к действию помехи может иметь место. Достаточно стабильный максимум при  $\tau_n = \tau_m = 100$  мкс был получен только при  $R < 50$  мс.

Все остальные пороговые измерения в условиях действия импульсной помехи выполнены при  $\tau_m = 50, 200$  и  $500$  мкс, средние пороговые кривые для которых приведены на рис. 5. Для сравнения приведена также пороговая кривая для  $\tau_m = 100$  мкс (кривая 1 на рис. 3в, полученная по достаточно большому массиву пороговых данных). Как показывает рис. 5, кривые для  $\tau_m = 50$  и  $200$  мкс так же, как и для  $\tau_m = 100$  мкс, обнаруживают максимум при  $\tau_n = \tau_m$ . Наиболее высокий максимум (15 дБ) наблюдается при  $\tau_m = 50$  мкс, причем для этого значения тестовой задержки нет выраженной тенденции к уменьшению высоты максимума с ходом опытов (12 опытных дней). Однако, разница в высоте максимума для  $\tau_m$  равных 50 и 100 мкс, может в какой-то степени объясняться тем, что кривая для  $\tau_m = 100$  мкс получена при большей длительности паузы между последовательными сериями пар импульсов помехи ( $R = 30$  мс для  $\tau_m = 100$ ,  $R = 15$  мс для  $\tau_m = 50$  мс). Но низкий максимум для  $\tau_n = \tau_m = 200$  мкс скорее определяется именно значением задержки в тестовой паре, для которой измерения выполнялись при самой малой длительности паузы  $R$ . Отметим, что задержка 200 мкс находится в районе границы критического интервала [7]. За этой границей (при  $\tau_m = 500$  мкс) зависимости порогов обнаружения тестовой пары от  $\tau_n$  вообще не получено. Рис. 5 показывает также, что пороговые кривые для тестовых задержек в диапазоне 50–200 мкс при задержках  $\tau_n$  в парах импульсов помехи за пределами критического интервала снова поднимаются. К этому надо добавить, что для  $\tau_m = 100$  мкс и при задержке в парах импульсов помехи  $\tau_n = 500$  мкс наблюдается очень большой разброс порогов (рис. 4в и рис. 5).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты показали, что при тестовых парах равновеликих импульсов с межимпульсным интервалом  $t_m < 500$  мкс может быть получена избирательность маскирующего действия импульсной помехи в зависимости от межимпульсного интер-

вала в парах импульсов помехи  $\tau_n$  (при равновеликих импульсах помехи). Более сильный маскирующий эффект наблюдается вблизи совпадающих значений задержки в тестовой паре и в парах импульсов помехи  $\tau_n = \tau_m$ . Максимум маскирующего действия приходится точно на значение  $\tau_n = \tau_m$ , по обе стороны от которого наблюдается падение маскирующего эффекта. Эта избирательность, напоминающая кривые маскировки тона тоном, наводит на мысль, что при действии импульсной помехи происходит своеобразная маскировка сложного тона тестовой пары (time separation pitch (TSP), имеющего частоту  $1/\tau_m$ , сложным тоном помехи при частоте  $1/\tau_n$ ). Сложным тоном в литературе часто называют периодические сигналы, состоящие из набора гармоник, или непериодические сигналы с гребенчатой спектральной плотностью (пары или последовательности импульсов или особые шумы, получаемые путем сложения двух одинаковых отрезков шума с некоторой задержкой [11]). Высота сложного тона приходится на основную частоту  $f_0 = 1/\tau$ .

Предположение о возможности маскировки сложным тоном появилось впервые в работе [11] при исследовании порогов слышимости простых тонов при действии импульсной помехи. Монотонно падающую кривую маскировки в зависимости от частоты простого тона с высоким максимумом на основной частоте помехи удалось объяснить на основе предположения о маскирующем эффекте высоты тона импульсной помехи.

Полученная в настоящих экспериментах избирательность маскирующего действия помехи при межимпульсных интервалах в парах импульсов помехи, лежащей в пределах критического интервала, оказалась устойчивой при длительности паузы между последовательными сериями пар импульсов помехи  $R < 50$  мс. Значение длительности паузы  $R$ , показанное в настоящих экспериментах, напоминает эффект комбинированной маскировки [5, 16]. Комбинированная маскировка превышает сумму прямой и обратной маскировки в отдельности. Эффект комбинированной маскировки объясняется наличием в нейронной обработке некоторого временного окна, в котором оценивается усредненное значение отношение сигнал/помеха. Это окно может смещаться, устанавливаясь в позиции, в которой отношение сигнал/помеха оказывается наиболее высоким. Более высокое отношение сигнал/шум, может быть получено, когда временное окно не центрируется на тестовом сигнале. При прямой маскировке в оптимальном случае окно центрируется после сигнала, в то время как при обратной маскировке – перед сигналом. При комбинированной маскировке временное окно центрировано на тестовом сигнале, но включает в себя оба маскира (прямой и обратный). В этом случае отношение

сигнал/помеха уменьшается, и возникает дополнительная маскировка [16].

Можно предположить, что при маскировке сложным тоном действует подобное временное окно. Высота сложного тона имеет большую или меньшую силу в зависимости от значения задержки и глубины осцилляций спектра [17, 18]. Маскирующее действие сложного тона, обусловленное силой высоты сложного тона, зависит не только от задержки и глубины осцилляций спектра [17, 18], но и от длительности паузы  $R$  между последовательными сериями пар импульсов помехи. В течение ограниченного времени (в пределах  $R \approx 15$  мс) сложный тон помехи имеет максимальную силу. При  $R \leq 30$  мс пауза оказывается слишком кратковременной, чтобы можно было путем смещения временного окна полностью исключить маскирующее действие высотной составляющей импульсной помехи, но длительность  $R = 50$  мс оказывается уже достаточной, чтобы можно было в процессе тренировки найти позицию временного окна, при которой маскирующий эффект сложного тона исключается. Таким образом, в основе тренировки может иметь место механизм активного поиска позиции временного окна, при которой маскирующий эффект сложного тона может быть минимален или вообще исключен.

Показано [4, 18], что у дельфинов сила высоты шумов с гребенчатой спектральной плотностью достигает максимума при задержке 100 мкс и падает по разные стороны от нее. Кривые избирательности маскировки, полученные в настоящей работе для задержки в тестовой паре 100 мкс, обнаруживают аналогичную зависимость от задержки в парах импульсов помехи, подобие разных функций от задержки как будто вынуждает объяснить кривую маскировки для  $\tau_m = 100$  мкс просто присущей именно задержке 100 мкс максимальной силой высоты пар импульсов помехи. Однако и для тестовых задержек 50 и 200 мкс также получена  $\Lambda$ -образная функция зависимости маскировки от задержки в парах импульсов помехи с максимумом при  $\tau_n = \tau_m$ . Для объяснения кривых избирательности действия импульсной помехи на различение пары импульсов и одиночного импульса была предположена гипотеза о наличии в слуховой системе дельфинов специализированных каналов, настроенных на межимпульсный интервал, подобно тому, как частотные слуховые каналы настроены на определенную частоту [12]. Данные настоящей работы не противоречат этой гипотезе. Здесь можно добавить только, что специализированные каналы с настройкой на межимпульсный интервал являются также каналами высоты тона импульсных последовательностей.

В литературе представлены психоакустические данные относительно избирательности дей-

ствия надпороговых амплитудно-модулированных (АМ) или частотно-модулированных (ЧМ) тонов на пороги обнаружения частоты модуляции тонов [19–22]. В работе [23] отмечен подъем порогов для линейной ЧМ только, когда мгновенные частоты надпорогового и тестовых стимулов изменялись в одном и том же направлении. Результаты этих работ были объяснены адаптацией в системе гипотетических “каналов”, настроенных на некоторые определенные особенности стимула. В литературе, однако, выражались сомнения [24] в сенсорной природе избирательности, показанной в работах [19–23]. Сомнения были вызваны малой величиной пороговых изменений, вызываемой надпороговой экспозицией, и тем, что эти изменения исчезали в процессе тренировки [25, 26]. Однако позднее появилась работа [27] в которой действие надпорогового воздействия ЧМ тоном, хотя именовалось уже маскировкой, но автор все-таки настаивал на признании существования специализированных АМ и ЧМ каналов в слуховой системе человека.

В настоящей работе сдвиг порога обнаружения пары импульсов в ответ на воздействие надпороговой импульсной помехи достигал 15 дБ. Кроме того, удалось найти параметры помехи, при которых получен стабильный сдвиг порогов, что также говорит в пользу гипотезы о каналах высоты тона импульсных последовательностей в слуховой системе дельфинов.

Большинство кривых на рис. 4 независимо от уровня помехи не опускаются ниже уровня 20–27 дБ над порогом обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи (пунктирные прямые). Пара импульсов имеет высоту тона в том смысле, что испытуемый может с довольно большой точностью подобрать для каждой пары близкий по частоте простой тон, определяемый обратным значением межимпульсного интервала. Однако испытуемый всегда отличает на слух пару импульсов и простой тон. Это значит, что сложный стимул (например, пара импульсов или шум с гребенчатым спектром) имеет еще и другие слуховые (субъективные) признаки. По данным психоакустических исследований, человек при прослушивании шумов с гребенчатой спектральной плотностью воспринимает кроме высоты еще и шумовую компоненту [28]. Выше говорилось, что кривая слышимости чистых тонов в условиях действия импульсной помехи [11] включает несколько компонент. Поведение двух из них может быть связано с периодичностью спектральной плотности пары импульсов. Третья компонента, имеющая довольно высокий уровень, не проявляет признаков периодичности спектральной плотности помехи и может интерпретироваться как результат ощущения, возникающего при восприятии пар импульсов помехи в виде случайного шума. В основе третьей компоненты лежит

спонтанная нервная активность, вызванная импульсной помехой в разных частотных каналах. Общий сдвиг пороговых кривых относительно порога обнаружения тестовой пары в отсутствие помехи, показанный пунктиром на рис. 4, также может соответствовать шумовой компоненте в восприятии помехи не зависимо от задержки  $\tau_n$ . Рисунок 4 показывает двойственный характер ощущения пары и то, что тональная и шумовая компоненты ведут себя практически независимо одна от другой. По-видимому, шумовая и высотная слуховые компоненты связаны с разными уровнями обработки сигнала в слуховой системе. Шумовая компонента имеет скорее всего периферическое происхождение, а высотная – более центральное.

В поведении кривых маскировки при импульсной помехе остается необъясненным подъем порогов при задержках, превышающих критический интервал (более 200 мкс). В переходной зоне задержек между парой, являющейся на слух слитным стимулом, имеющим высоту тона, и парой отдельно воспринимаемых импульсов, когда исчезает признак высоты, помеха приобретает слуховые свойства квазислучайного шума, и возникает эффект маскировки сложного тона тестовой пары шумом с квазислучайным спектром. Возможно, что в переходной зоне задержек на низких частотах еще сохраняется периодичность спектральной плотности и связанная с ней высота тона. В процессе тренировки слуховая система адаптируется так, чтобы исключить действие высокочастотных флюктуаций спектральной плотности помехи, чем объясняется наблюдавшееся резкое изменение порога при  $t_m = 500$  мкс для  $\tau_n = 100$  мкс после длительных экспериментов (рис. 4в). Интересно, что для тестовой задержки более критического интервал ( $t_m = 500$  мкс) повышения маскирующего эффекта импульсной помехи с ростом задержки в парах импульсов помехи не наблюдается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненных исследований сформулируем следующим образом:

1. Наблюдается стабильный эффект избирательности маскирующего действия импульсов помехи в зависимости от значения задержки между импульсами в парах при тестовых задержках 50–200 мкс при длительности паузы между последовательными сериями пар импульсов помехи  $R \leq 30$  мс. Избирательность проявляется как превышение уровня маскировки в области вокруг значения задержки, при которой задержка в парах импульсов помехи и тестовой паре совпадают  $\tau_n = \tau_m$ . Максимум маскировки точно приходится на совпадающее значение задержки.

Все кривые маскировки в целом проходят на довольно высоком и приблизительно постоянном уровне относительно порога обнаружения пары в отсутствие помехи.

2. При достаточно большом интервале между последовательными сериями пар импульсов помехи ( $R = 50$  мс) в процессе тренировки кривые маскировки уплощаются.

4. Для тестовой задержки 500 мкс эффекта избирательности не получено.

5. Новый подъем порога наблюдается за пределами области избирательной маскировки вокруг совпадающих значений задержки в парах импульсов помехи и тестовой задержки.

Предполагается, что восприятие пар импульсов включает различные слуховые (субъективные) признаки. Пары с задержкой 2-ого импульса менее 500 мкс имеют на слух высоту тона на частоте, равной обратному значению задержки, а также шумовой признак. Предполагается, что шумовая компонента связана с довольно высоким уровнем спонтанной нервной активности в слуховых фильтрах, вызванной действием импульсной помехи, в то время как тональная компонента обусловлена периодичностью спектральной плотности пары импульсов. Маскирующий эффект вокруг совпадающих значений задержки в тестовой паре и парах импульсов помехи вызван своеобразной маскировкой сложного тона тестовой пары сложным тоном пар импульсов помехи. В процессе тренировки при достаточно большой паузе между последовательными сериями пар импульсов помехи включаются адаптивные механизмы, позволяющие слуховой системе исключить маскирующее действие сложного тона. Маскирующий эффект, связанный с шумовым признаком пары, в процессе тренировки сохраняется.

Работа поддержана грантом РФФИ 03-04-48746.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spiegel, M.F. Speech masking. I. Simultaneous and non-simultaneous masking within stop and flap closures // J. Acoust. Soc. Am. 1987. № 5. V. 82. P. 1492–1502.
2. Spiegel, M.F. Speech masking. II: Stimultaneous masking thresholds under "naturalistic" listening conditions // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 84. № 6. P. 2033–2044.
3. Белькович В.М., Дубровский Н.А. Сенсорные основы ориентации китообразных. Л.: Наука, 1976. С. 204.
4. Au W.W.L. The sonar of dolphins. Springer Verlag. 1993. P. 277.
5. Au W.W.L., Hammer C.E. Jr. Target recognition via echolocation by *Tursiops truncatus* / In: Animal Sonar Systems. Ed. by R.G. Busnel and J.F. Fish. Plenum, New York. 1980. P. 855–858.
6. Moore P.W.B., Hall R.W., Friedl W.A., Nachtigall P.E. The critical interval in dolphin echolocation: What is it? // J. Acoust. Soc. Am. 1984. V. 76. № 1. P. 314–317.
7. Вельмин В.А., Дубровский Н. А. О слуховом анализе дельфинами импульсных звуков // ДАН СССР. 1975. Т. 225. № 2. С. 229–232.
8. Вельмин В.А., Дубровский Н.А. Критический интервал активного слуха у дельфинов // Акуст. журн. 1976. № 2. С. 351–352.
9. Дубровский Н.А. Эхолокационный анализатор черноморской афалины. В: Черноморская афалина". 1997. Москва. "Наука". Ред. Соколов В.Е., Романенко Е.В.
10. Супин А.Я., Попов В.В. Циклы восстановления вызванных потенциалов ствола мозга дельфина при парных акустических раздражениях // ДАН СССР. 1985. Т. 283. С. 740–743.
11. Дубровский Н.А., Сухорученко М.Н. Пороги слышимости чистых тонов в условиях действия импульсной помехи у дельфина афалины // Акустический журнал. 2002. Т. 48. № 4. С. 504–511.
12. Sukhoruchenko M.N. Selective hearing adaptation to paired pulses in *Tursiops truncatus*. In: Marine Mammal Sensory Systems. Ed.: Thomas J.A., Kastelein R.A., Supin A.Ya. Plenum Press. New York and London. 1991. P. 277–286.
13. Levitt H. Transformed up-down methods in psychoaoustics // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 49. № 2. P. 467–477.
14. Урбах В.Ю. Биометрические методы. Москва. "Наука". 1964.
15. Wilson L.H., Carhart R. Forward and backward masking: Interaction and additivity // J. Acoust. Soc. Am. V. 49. № 4. (Part 2) P. 1254–1263.
16. Robinson C.E., Pollack I. Interaction between forward and backward masking: a measure of the integrating period of the auditory system // J. Acoust. Soc. Am. 1973. V. 53. № 5. P. 1313–1316.
17. Yost W.A. Strength of the pitch associated with rippled noise // J. Acoust. Soc. Am. 1978. V. 64. P. 485–492.
18. Au W.W.L., Pawloski J.L. Detection of ripple noise by an Atlantic bottlenose dolphin // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86. P. 591–596.
19. Kay R.H., Matthews D.R. On the existence in human auditory pathways of channels selectively tuned to the modulation present in frequency-modulated tones // J. Acoust. Soc. Am. 1972. V. 225. P. 657–677
20. Green G.G., Kay R.H. The adequate stimuli for channels in the human auditory pathways concerned with the modulation present in frequency -modulated tones // J. Physiol. (London). 1973. V. 234. P. 50–52.
21. Green, G.G., Kay R.H. Channels in the human auditory system concerned with the waveform of the modulation present in amplitude- and frequency-modulated tones // J. Physiol. (London). 1974. V. 241. P. 29–30.
22. Regan D., Tansley D. Selective adaptation to frequency-modulated tones: Evidence for an information-processing channel selective to frequency changes // J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 65. P. 1249–1257.

23. Gardner R. B., Wilson J. P. Evidence for direction – specific channels in the processing of frequency modulation // J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 66. P. 704–709.
24. Wakefield G. H., Viemeister N.F. Selective adaptation to linear frequency-modulated sweeps// Evidence for direction-specific channels? // J. Acoust. Soc. Am. 1984. V. 75. P. 1588–1592.
25. Tansley B.W., Suffield J.B. Time course of adaptation and recovery of channels selectively sensitive to frequency and amplitude modulation // J. Acoust. Soc. Am. 1983 V. 74. P. 765–775.
26. Moody D.B, Cole D., Davidson L.M, Stebbins W.C. Evidence for a reappraisal of the psychophysical selective adaptation paradigm // J. Acoust. Soc. Am. 1984. V. 76. P. 1076–1079.
27. Bacon B., Grantham D.V. Modulation masking: Effects of modulation frequency, depth, and phase // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 85. № 6. P. 2575–2580.
28. Patterson R., Handel S., Yost W.A., Datta A.J. The relative strength of the tone and noise components in iterated rippled noise // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 100. № 5. P. 3286–3294.

## Auditory Detection of Paired Pulses by a Dolphin in the Presence of a Pulse Jam

M. N. Sukhoruchenko

From behavioral studies of a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*), the audibility thresholds were measured for a single pair of equal-amplitude pulses, i.e., clicks, presented to the dolphin in combination with a pulse jam. The pulse jam consisted of pairs of identical pulses with a pulse spacing  $\tau_j$  within the pairs and a pair repetition rate  $f_j$ . Series of pulses were interrupted by a pause  $R > 1/f_j$ , within which the pulse jam was absent while a pair of test pulses was supplied to one of the two channels at random. Each series had a duration  $T$ , and the total stimulation cycle was  $J = T + R$ . The dependence of the test pair detection threshold on the pulse spacing  $\tau_j$  was studied at different fixed values of the pulse spacing in the test pair:  $\tau_t = 50, 100, 200, \text{ and } 500 \mu\text{s}$ . Preliminary measurements performed with  $\tau_t = 100 \mu\text{s}$  were used to adjust the parameters of the pulse jam. The threshold shift at  $\tau_j = \tau_t = 100 \mu\text{s}$  reached 35 dB above the audibility threshold of the test pair in the absence of the pulse jam. On both sides of the point  $\tau_j = \tau_t = 100 \mu\text{s}$ , the thresholds decreased with varying  $\tau_j$  to approximately 20 dB above the detection threshold of the test pair in the absence of the jam. However, in the course of training, the threshold curves gradually shifted downwards approaching the detection level of the test pair in the absence of the jam and becoming progressively flatter (the selectivity with respect to the pulse jam vanished). A decrease in the pause duration  $R$  restored the dependence of the test pair detection threshold on  $\tau_j$ . In this case, a statistically significant maximum was obtained at  $\tau_j = \tau_t$  for  $\tau_t$  within the critical interval (for  $\tau_t < 500 \mu\text{s}$ ). Beyond the critical interval (for  $\tau_t > 500 \mu\text{s}$ ), even with the smallest pause duration ( $R = 15 \text{ ms}$ ), no dependence of the test pair detection thresholds on  $\tau_j$  could be observed.

Сдано в набор 11.03.2004 г.

Подписано к печати 14.05.2004 г.

Формат бумаги  $60 \times 88^{1/8}$

Офсетная печать

Усл. печ. л. 18.0

Усл. кр.-отт. 4.7 тыс.

Уч.-изд. л. 18.5

Бум. л. 9.0

Тираж 255 экз.

Зак. 8414

Учредитель: Российская академия наук

Адрес издателя: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"

Отпечатано в ППП "Типография "Наука", 121099, Москва, Шубинский пер., 6