

УДК 612.821

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ СИГНАЛОВ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В УСЛОВИЯХ ЭФФЕКТА ПРЕДШЕСТВОВАНИЯ

© 2020 г. М. Ю. Агаева<sup>1</sup>, \*, Н. И. Никитин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: agami\_1@mail.ru

Поступила в редакцию 21.12.2018 г.

После доработки 22.05.2019 г.

Принята к публикации 03.09.2019 г.

В данной работе исследовали взаимодействие сигнала и маскира при локализации движущегося сигнала в условиях эффекта предшествования. Эффект предшествования – феномен характеризующий помехоустойчивость слуховой системы при локализации источника звука. Для создания эффекта использовали два одинаковых сигнала, один из которых служил неподвижным маскиром, другой – движущимся целевым сигналом. Движущийся сигнал предъявлялся с задержкой от начала включения маскирующего сигнала. Задержка варьировала в пределах 1–40 мс. Сигнал предъявлялся с левой от испытуемого стороны и перемещался по двум траекториям в пределах 18–52 и 52–86 град. Неподвижный маскир располагался справа под углом 15 град. Испытуемые оценивали начальное и конечное положение движущегося сигнала и местоположение неподвижного маскира. Данные локализации движущегося сигнала в условиях эффекта предшествования сравнивались с пространственными оценками того же сигнала при его изолированном предъявлении. Было показано, что предъявление маскира вызывает смещение начальных и конечных точек субъективной траектории движения сигнала и ее укорочение. Величина и знак смещения зависят от направления движения сигнала. Начальные точки воспринимаемого движения сигнала смещаются по направлению движения сигнала, конечные точки – в обратном направлении. Под действием движущегося сигнала локализация маскира смещается в сторону предъявления сигнала.

*Ключевые слова:* эффект предшествования, движение источника звука, порог подавления эха.

**DOI:** 10.31857/S0131164620010026

Эффект предшествования является слуховым феноменом, характеризующим способность человека и животных локализовать источник звука в пространстве, несмотря на наличие множества отраженных от различных поверхностей звуковых волн. В его основе лежит выделение дирекционной информации от первых звуковых волн, идущих прямо от источника звука (прямого звука) при одновременном подавлении дирекционной информации об отраженных звуковых волнах (эхо-сигнала), приходящих с некоторой задержкой [1–4]. В широком смысле эффект предшествования представляет собой частный случай бинауральной маскировки. Его отличительной особенностью является наличие взаимной корреляции прямого и отраженного сигналов. В реальных условиях степень взаимной корреляции сигналов может варьировать в достаточно широких пределах [3].

Обычно для моделирования эффекта предшествования используется установка из двух гром-

коговорителей, расположенных по обе стороны от слушателя и излучающих одинаковые сигналы. Если сигналы от источников излучаются одновременно, у слушателя возникает слитный звуковой образ, находящийся прямо напротив слушателя. При введении задержки между сигналами до 1 мс звуковой образ смещается в сторону громкоговорителя, включенного первым (эффект локализации). При дальнейшем увеличении задержки сначала становятся заметными изменения в тембре звучания сигнала, а затем звуковой образ распадается на две части, ощущаемые в разных направлениях (порог слышимости эха). Таким образом, действие эффекта предшествования ограничено с одной стороны эффектом локализации, с другой стороны – порогом слышимости эха [3].

В условиях предъявления неподвижных сигналов степень подавления эхо-сигнала и, следовательно, выраженность эффекта предшествования зависит как от временного, так и от простран-

ственного разделения между сигналами. Подавление эхо-сигнала больше, если источники сигналов находятся вблизи друг друга, и меньше, если они пространственно разнесены [5–7]. Наряду с этим воспринимаемая локализация эхо-сигнала зависит от временной задержки между включениями стимулов. При коротких задержках информация от прямого сигнала доминирует, что приводит к ощущению слитной локализации звука в области нахождения источника прямого звука. При увеличении задержки воспринимаются два сигнала, однако их субъективное положение не является взаимно независимым [5, 6, 8]. Например, если прямой сигнал подается по центру, а эхо-сигнал справа или слева относительно средней линии головы, то воспринимаемая локализация эхо-сигнала при малых задержках смещена в направлении прямого звука [5, 6]. С ростом задержки это смещение постепенно уменьшается. Однако, если же прямой сигнал располагается слева, а эхо-сигнал справа, то подобного смещения не наблюдается. В свою очередь, эхо-сигнал может оказывать влияние на локализацию прямого сигнала. Как показали исследования, субъективная локализация прямого сигнала немного смещается в сторону запаздывающего эхо-сигнала. У разных испытуемых это явление может проявляться в разной степени [5, 6].

В отличие от неподвижных сигналов, при использовании движущихся сигналов пороги подавления задержанного эхо-сигнала не зависят от взаимного расположения сигналов [9]. Кроме того, направление движения задержанного сигнала (в сторону прямого сигнала и при удалении от него), также положение его траектории относительно локализации прямого сигнала (вблизи или вдаль) не обнаруживали достоверного влияния на величину порога подавления.

Различия эффекта предшествования для движущихся и неподвижных сигналов перекликаются с данными по бинауральной маскировке сигналов. При исследовании эффекта бинаурального освобождения от маскировки показано, что движение звуковых сигналов вызывает усиление этого эффекта [10]. Обнаружено также, что в условиях звуковой реверберации различение скорости движения звука практически не страдает, в то время как локализация неподвижного источника звука существенно ухудшается [11].

Взаимодействие сигналов в условиях локализации движущегося источника звука остается малоизученным. Данная работа проведена с целью изучения этого взаимодействия в условиях эффекта предшествования. Исследовалась локализация источников звука при совместном предъявлении движущегося и неподвижного сигналов. Оценивали зависимость характеристик локализации от пространственного разнесения сигналов,

временной задержки между ними и направления движения целевого сигнала.

## МЕТОДИКА

В эксперименте участвовали 8 испытуемых (женщины в возрасте от 20 до 42 лет) с нормальным слухом.

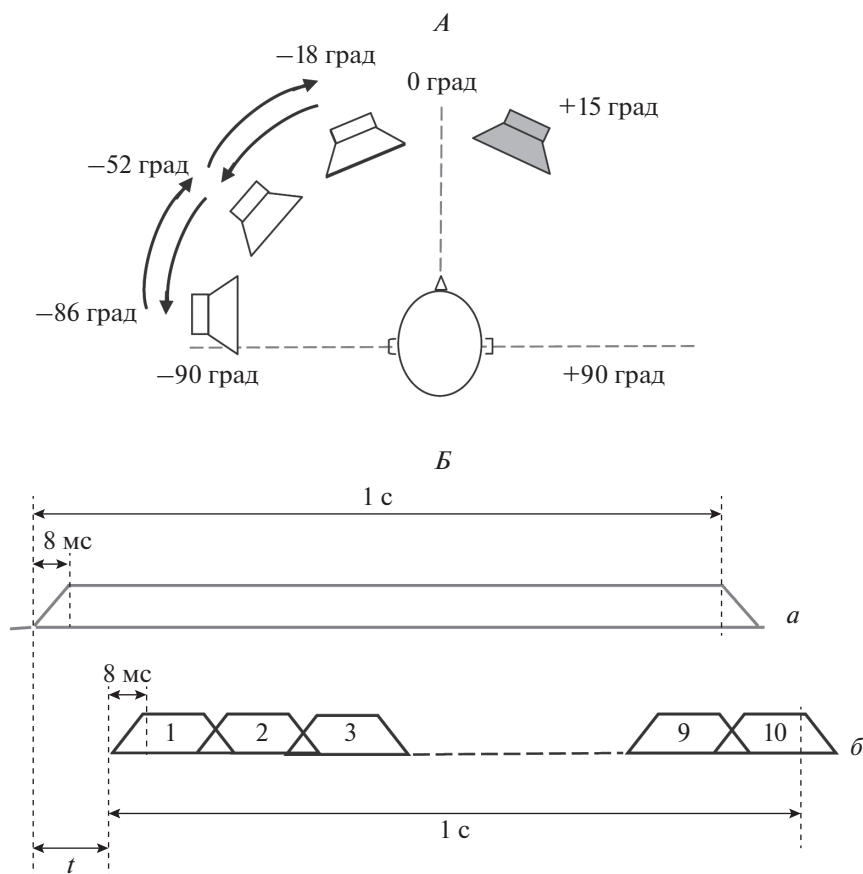
Исследования проводили в анэхоидной камере размером  $3 \times 3 \times 4.5$  м. В камере находилась полукружная поворотная дуга радиусом 1 м, установленная в горизонтальной плоскости. Вдоль дуги на равном расстоянии друг от друга располагали 49 громкоговорителей (*Visaton SC 5.9*, Германия) с близкими частотными характеристиками. Различия амплитудно-частотных характеристик громкоговорителей не превышали  $\pm 4$  дБ в полосе 0.2–18 кГц. Угловое расстояние между соседними громкоговорителями составляло 3.75 град.

Испытуемый находился в кресле, расположенном в центре дуги лицом к центральному громкоговорителю (0 град по азимуту), а два крайних громкоговорителя находились прямо напротив правого (+90 град) и левого (–90 град) ушей слушателя (рис. 1, А). Голову испытуемого фиксировали с помощью специального головодержателя типа “Филадельфия” (Тайвань).

В качестве звукового сигнала использовали широкополосный шум с полосой 5–18 кГц, синтезированный цифровым способом с частотой дискретизации 44.1 кГц. Один и тот же сигнал подавали на два канала, один из которых использовали для предъявления маскира, другой — для формирования движущегося сигнала.

Для создания эффекта предшествования последовательно предъявлялись два одинаковых сигнала. Опережающий сигнал служил в качестве маскира, запаздывающий сигнал — в качестве целевого стимула. Маскер подавали от неподвижного источника звука, целевой сигнал двигался по дуге длиной 34 град. Длительность обоих сигналов составляла 1 с. Временная задержка между включениями сигналов составляла 1, 2, 3, 5, 8, 12, 18, 25 и 40 мс (рис. 1, Б). Движение целевого сигнала создавали путем последовательного переключения 10 громкоговорителей. На каждый из громкоговорителей подавали сигнал длительностью 100 мс с фронтами нарастания-спада 8 мс. Звук плавно переходил с одного громкоговорителя на другой без слышимых разрывов за счет одновременного затухания сигнала на предыдущем громкоговорителе и его нарастания на последующем.

Неподвижный маскер предъявляли от источника, расположенного под углом 15 град справа относительно средней линии головы испытуемого. Движущийся сигнал предъявляли с левой стороны и перемещали в двух направлениях: слева —



**Рис. 1.** Схема сигналов.

*A* – схема расположения источников звука относительно испытуемого для маскира движущихся сигналов. Маскер предъявляется от источника звука, расположенного справа под углом  $+15$  град (серый громкоговоритель). Белые громкоговорители показывают локализацию начала и конца движущегося сигнала. Стрелки – направление движения сигнала. *Б* – схематичное представление неподвижного маскира (*a*) и движущегося сигнала (*б*). Цифрами обозначены шумовые послышки, создающие движение сигнала.  $t$  – задержка между маскиром и сигналом.

направо (приблизился к маскеру) и справа – налево (удалялся от маскира). Использовали две траектории движения сигнала, удаленные на разное угловое расстояние от маскира. Ближнюю к маскеру траекторию располагали в пределах от  $-18$  до  $-52$  град, дальнюю – от  $-52$  до  $-86$  град (рис. 1, *A*). В работе анализировали данные локализации для 4 условий, которые включали в себя две траектории движения сигнала и два направления его движения.

Интенсивность маскира составляла 44 дБ УЗД (уровня звукового давления), движущегося сигнала – 35 дБ УЗД. При акустическом измерении в точке расположения центра головы испытуемого использовали специальную аппаратуру: 1/2 дюймовый микрофон 4190, предусилитель 2669, усилитель 2609 (Брюэль и Кьер, Дания).

Ответы испытуемых регистрировали при помощи графического планшета (*Genius G-pen 450*, Тайвань) на рабочей поверхности которого была схематически изображена дуга. После прослуши-

вания звуковых сигналов испытуемый должен был спроецировать воспринимаемое положение начальной и конечной точек движения сигнала или точки расположения маскира на рабочую поверхность планшета и электронным пером пометить эти точки. Координаты выбранных точек определяли автоматически с помощью специально разработанной компьютерной программы.

Перед первым экспериментом все испытуемые тренировались различать и отмечать на планшете движущийся сигнал в течение 20 мин. В начале каждого эксперимента проводили тренировку в течение 5 мин. Тренировку всегда начинали с максимальной задержки 1200 мс. Все испытуемые при такой задержке слышали два последовательно звучащих сигнала: первый – справа от средней линии головы, второй – слева. Затем задержку последовательно уменьшали до 1 мс и в последующем варьировали в случайном порядке от 1 до 40 мс. После этого переходили к основной части эксперимента, в которой временные задержки

предъявляли в псевдослучайном порядке. Каждую из задержек в основном эксперименте использовали 12 раз. По ходу звуковой стимуляции каждый стимул с определенной задержкой предъявляли по 2 раза с интервалом 1 с, после чего регистрировали ответ испытуемого. Исследование проводили в 8 отдельных экспериментах по два для каждого из условий.

На основании пространственных оценок испытуемых определяли вероятность локализации движущегося сигнала для разных значений задержки между маскером и сигналом. При вероятности 100% испытуемый во всех пробах локализовал движущийся сигнал, при нулевой – локализовал только маскер и не обнаруживал движущийся сигнал. Промежуточные значения вероятности соответствовали локализации движущегося сигнала только в части проб. У каждого испытуемого вероятности усредняли для каждого значения задержки по результатам 20 проб.

Для количественной оценки взаимодействия сигнала и маскера проводили два контрольных эксперимента. В одном из них испытуемые определяли положение начальной и конечной точек траектории движения сигнала при изолированном предъявлении тех же сигналов, которые использовали в основном эксперименте с парной стимуляцией. Во втором эксперименте определяли локализацию неподвижных источников звука, расположенных под углами, соответствующими положениям начальных и конечных точек движущихся сигналов (–86 град, –52 град, –18 град) и положению маскера (+15 град). Дополнительные эксперименты проводили на тех же испытуемых, которые принимали участие в основных экспериментах, за исключением одного человека. Данные дополнительных экспериментов служили в качестве исходных для сравнительного анализа эффектов взаимодействия сигнала и маскера.

Для количественного анализа пространственных эффектов взаимодействия сигнала и маскера вычислялась разность локализационных оценок испытуемых, полученных при совместном предъявлении сигнала и маскера и при предъявлении каждого из них в отдельности:

$$X_{1n} - X_{2n} = \Delta X_n, \text{ для начальных точек, } (1)$$

$$X_{1k} - X_{2k} = \Delta X_k, \text{ для конечных точек, } (2)$$

где  $X_1$  – локализация испытуемыми движущегося сигнала при его изолированном предъявлении для начальных (n) и конечных (k) точек в градусах.  $X_2$  – локализация сигнала в присутствии маскера.  $\Delta X$  – сдвиг начальных и конечных точек воспринимаемого движения сигнала под действием маскера. Разности вычислялись для каждой траектории и двух направлений движения для каждого испытуемого в отдельности. С целью унификации размерности полученные разности

представлялись в относительных единицах. Для этого величину сдвига локализации выражали через отношение к длине субъективной траектории при изолированном предъявлении сигнала:

$$\Delta X / (X_{1n} - X_{1k}) = X_0. \quad (3)$$

Величина  $X_0$ , рассчитанная для начальных и конечных точек, показывает выраженность субъективного сдвига относительно длины субъективной траектории. Относительный сдвиг не зависит от длины субъективной траектории, которая могла варьировать у разных испытуемых.

Для оценки возможного влияния движущегося сигнала на локализацию маскера вычислялась разность между локализацией маскера при его изолированном предъявлении и при его совместном предъявлении с движущимся сигналом:

$$Y_1 - Y_2 = \Delta Y, \quad (4)$$

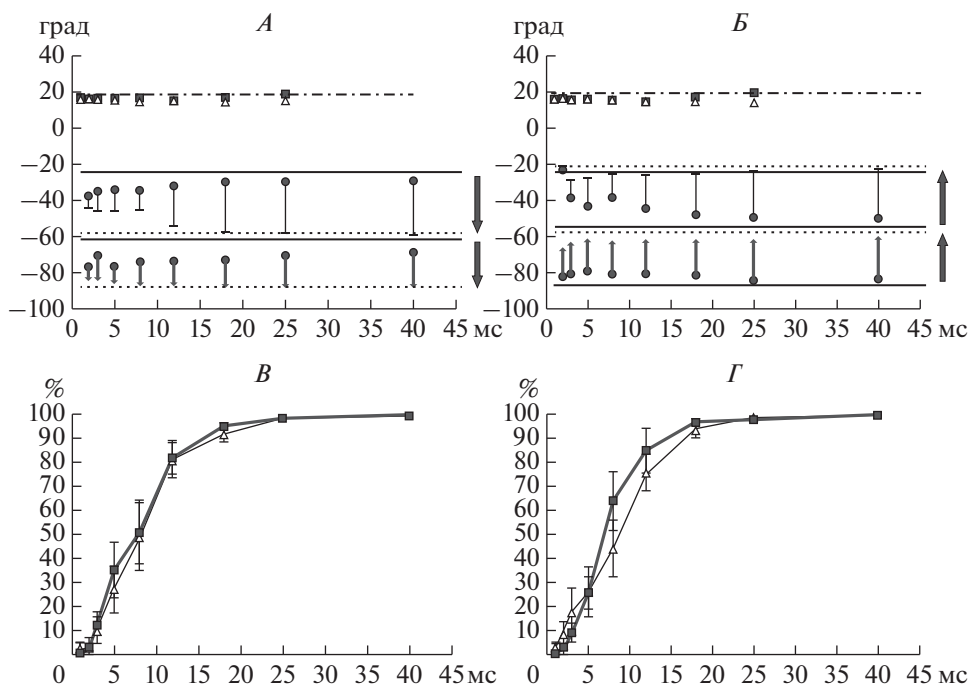
где  $Y_1$  – локализация одного маскера,  $Y_2$  – локализация маскера при действии движущегося сигнала,  $\Delta Y$  – величина сдвига субъективного положения маскера под действием сигнала. Величина субъективного сдвига, выраженная в градусах, вычислялась у каждого испытуемого в отдельности для каждого значения задержки.

Статистическую оценку данных проводили посредством дисперсионного трех факторного анализа для эхо-сигналов и двух факторного анализа для прямого сигнала с уровнем значимости  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При самых коротких задержках между маскером и сигналом испытуемые не обнаруживали движение сигнала и локализовали звук в области расположения маскера. На фоне отчетливой локализации маскера присутствие сигнала не ощущалось. С увеличением задержки испытуемые в отдельных пробах отмечали движение сигнала на стороне его предъявления. По мере увеличения задержки число проб, в которых испытуемый локализовал движущийся сигнал, монотонно возрастало. Как показывает рис. 2, *В, Г* вероятность локализации движущегося сигнала достигала 100%, начиная с задержек 20–25 мс.

На рис. 2, *А, Б* приведены средне-групповые данные локализации маскера и движущегося сигнала для двух направлений движения сигнала (*А* и *Б*) и двух траекторий – ближней (вверху) и дальней (внизу). Для сравнения горизонтальными линиями представлены данные локализации маскера и сигналов при их изолированном предъявлении в контрольных пробах. По сравнению с контролем длина субъективной траектории движения сигнала при действии маскера резко сужена на малых задержках. По мере увеличения задержки протяженность субъективной траектории постепенно



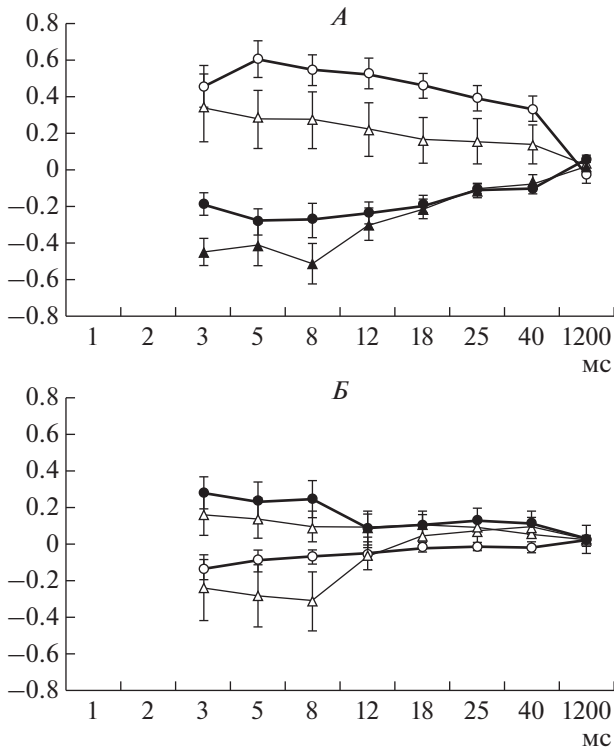
**Рис. 2.** Характеристики локализации маскера и движущегося сигнала в условиях эффекта предшествования. *A, B* – среднegrupповые данные локализация звуковых стимулов при удалении сигнала от маскера (*A*) и при приближении к нему (*B*). По оси абсцисс – временная задержка, в мс. По оси ординат – угловое смещение относительно средней линии головы, в градусах. Вверху: субъективное положение маскера при движении сигнала по ближней (треугольники) и дальней (квадратики) траекториям. Горизонтальная штрих-пунктирная линия – локализация маскера при его изолированном предъявлении. Внизу: вертикальные линии с маркерами – воспринимаемая траектория движения сигнала для ближней (тонкие линии) и дальней (жирные линии) траекторий. Кружки – субъективное положение начальной точки движения сигнала, черточки – конечной точки. Двойные стрелки справа – направление движения сигнала при его изолированном предъявлении. *B, Г* – среднegrupповые данные вероятности локализации сигнала при разных задержках между маскером и сигналом. По оси абсцисс – задержка, в мс, по оси ординат – значение вероятности, в процентах. Тонкая линия с треугольниками – ближняя траектория движения сигнала, жирная линия с квадратиками – дальняя траектория при удалении сигнала от маскера (*B*) и при приближении к нему (*Г*). Вертикальные линии – стандартная ошибка.

нарастает, приближаясь к контрольной величине при задержке 40 мс. Сужение субъективной траектории движения сигнала связано с двумя явлениями: сдвигом начальной точки в направлении движения сигнала и сдвигом конечной точки в обратном направлении. Кроме того, субъективное положение маскера в присутствии сигнала также не остается без изменений, демонстрируя небольшой сдвиг в сторону расположения сигнала.

Относительные сдвиги начальных и конечных точек, усредненные по всем испытуемым, представлены на рис. 3, *A, B*. Данные на задержках менее 3 мс были исключены, поскольку на этих задержках испытуемые крайне редко локализовали движущийся сигнал (менее чем в 10% проб). Положительные значения по оси ординат соответствуют сдвигу локализации сигнала в сторону удаления от маскера, отрицательные – в сторону маскера. 4 кривые на каждом графике соответствуют двум направлениям и двум траекториям движения сигнала. Верхняя пара кривых (белые

маркеры) соответствует удалению сигнала от маскера, нижняя пара – приближению к маскеру (черные маркеры). Дальняя и ближняя траектории движения сигнала обозначены жирной и тонкой линиями, соответственно.

На рис. 3, *A* показаны кривые сдвига локализации для начальной точки движения сигнала. При удалении сигнала от маскера (белые маркеры) направление сдвига совпадало с направлением движения сигнала (положительные значения). При движении в обратном направлении, в сторону маскера (черные маркеры), начальные точки смещались в область отрицательных значений, соответствующих сдвигу их локализации по направлению движения. Таким образом, независимо от направления движения сигнала сдвиг начальной точки субъективной траектории совпадал с направлением движения сигнала. Величина сдвига зависела от положения траектории и направления движения сигнала. При удалении сигнала от маскера наибольший сдвиг наблюдался при дви-



**Рис. 3.** Относительные сдвиги локализации начала и конца движения сигнала в присутствии маскера. А – начальные точки, Б – конечные точки. По оси ординат – сдвиг в относительных единицах. Положительные значения – удаление от маскера, отрицательные – приближение к маскеру. По оси абсцисс – задержка, в мс. Белые маркеры (кружки, треугольники) – сигнал удаляется от маскера, черные – приближается к маскеру. Жирная линия – дальняя траектория, тонкая линия – ближняя траектория. Вертикальные линии – стандартная ошибка. Среднегрупповые данные.

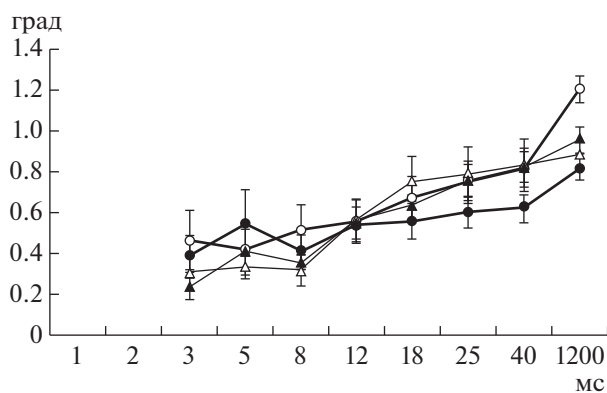
жении по дальней траектории, а при приближении к маскеру – по ближней траектории. С ростом задержки величина субъективного сдвига постепенно уменьшалась, приближаясь к контрольному уровню (нулевому). Сдвиг полностью исчезал при значительном разнесении во времени маскера и сигнала (1200 мс).

По сравнению с начальными точками, субъективные сдвиги конечных точек демонстрировали противоположные закономерности (рис. 3, Б). Для сигнала, удаляющегося от маскера, сдвиг конечной точки направлен в сторону маскера. Для сигнала, приближающегося к маскеру, конечные точки сдвигались в обратную сторону. В обоих случаях сдвиг конечной точки направлен против движения сигнала. Максимальный сдвиг в случае удаления сигнала от маскера наблюдался при удалении по ближней траектории, а в случае приближения сигнала к маскеру – по дальней траектории. Эти явления прямо противоположны тому, что наблюдалось в сдвигах начальных

точек. Кроме того, сдвиги конечных точек заметно уступали по величине сдвигам начальных точек. Сдвиги конечных точек, как и начальных, постепенно уменьшались с ростом задержки между маскером и сигналом.

Согласно дисперсионному трехфакторному анализу получены значимые различия для фактора *Направление движения* (к маскеру и от него) для всех значений задержки ( $F(1, 77) > 8.1, p < 0.05$ ), кроме задержки 1200 мс ( $F(1, 68) = 0.245, p = 0.622$ ). Для фактора *Траектория* (дальняя или ближняя) значимые различия были получены только для задержек 5 и 8 мс ( $F(1, 77) > 4.46, p < 0.05$ ). Для остальных значений задержек достоверных различий не было получено ( $F(1, 77) < 3.04, p > 0.05$ ). Значимые различия для фактора *Локализация* (начальные или конечные точки) отсутствовали ( $F(1, 77) < 4.86, p > 0.5$ ). Достоверно различалось смещение начальных точек для дальней и ближней траектории ( $p < 0.05$ ) для двух направлений движения сигналов за исключением задержки 40 мс для ближней траектории и 1200 мс для двух направлений движения ( $p > 0.5$ ). Для конечных точек достоверных различий в величине смещения между дальней и ближней траекториями не было выявлено ( $p > 0.5$ ). Достоверное взаимодействие было получено между факторами *Траектория* и *Направление движения* ( $F(1.7) > 0.21, p < 0.05$ ), для всех задержек кроме 1200 мс.

Взаимодействие факторов отражает определенную закономерность: чем больше смещение начальных точек, тем меньше смещение конечных. Максимальное смещение начальных точек наблюдалось при удалении сигнала от маскера по дальней траектории и при приближении к маскеру по ближней траектории (рис. 3, А). В обоих случаях смещение конечных точек было минимальным (рис. 3, Б). Одновременно выявлялась обратная зависимость: чем меньше было смещение начальной точки, тем на большую величину смещалась конечная точка. Минимальные сдвиги начальной точки наблюдались при удалении сигнала от маскера по ближней траектории и при его приближении к маскеру по дальней траектории. Сдвиги конечной точки в этих двух случаях были наибольшими. Таким образом, меньшее смещение начальных точек сопровождается приростом сдвига конечных точек, и наоборот. Как следствие этих изменений, длина субъективной траектории движения сигнала практически не зависела от направления движения сигнала и его пространственного положения. Кроме того, длина субъективной траектории сокращалась вследствие сдвига начальных точек по ходу движения и сдвига конечных точек в противоположную сторону. На рис. 4 представлены средне-групповые данные, демонстрирующие зависимость длины субъективной траектории движения сигнала от величины задержки. Данные представлены в от-

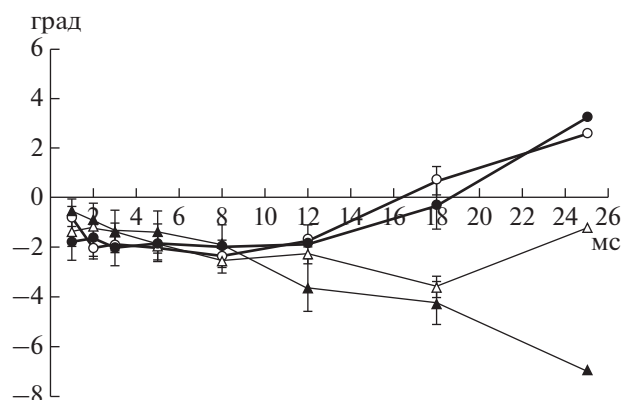


**Рис. 4.** Изменение длины субъективной траектории движения сигнала.  
По оси ординат — отношение длины субъективной траектории движения сигнала при действии маскира к величине траектории при изолированном действии сигнала. Остальные обозначения см. рис. 3.

носительных единицах, показывающих соотношение величин траекторий в присутствии маскира и без него. Как видно из рис. 4, кривые траекторий для разных сигналов практически совпадают. С увеличением задержки длина субъективной траектории монотонно возрастает. В исследованном диапазоне задержек (3–40 мс) длина субъективной траектории при действии маскира возрастала от 23–46 до 62–81% по сравнению с длиной траектории при изолированном действии сигнала.

Сравнительный анализ изменений длины субъективной траектории движения сигнала для двух траекторий и двух направлений движения, проведенный при помощи трехфакторного анализа, где факторами были *Направление движения*, *Траектория* и *Время задержки*, не показал наличие значимых различий для факторов *Направление движения* и *Траектория* ( $F(1, 334) = 3.201, p = 0.074$  и  $F(1, 334) = 0.604, p = 0.438$ , соответственно). Достоверные различия были получены только для фактора *Время задержки* ( $F(7, 334) = 16.998, p < 0.01$ ). Достоверных взаимодействий между этими факторами также не обнаружено ( $F(7, 334) < 1.236, p > 0.05$ ).

Данные по субъективному сдвигу маскира для четырех условий предъявления движущегося сигнала приведены на рис. 5. На задержках до 12 мс субъективное положение маскира смещено в сторону движущегося сигнала с тенденцией его увеличения с ростом задержки. При этом величина сдвига практически не зависела от положения траектории и направления движения сигнала. На задержках 12 мс и более кривые сдвига для дальней (жирные линии) и ближней (тонкие линии) траекторий движения сигнала расходятся. Для дальней траектории субъективный сдвиг маскира не зависит от направления движения сигнала.



**Рис. 5.** Смещение субъективной локализации маскира под действием движущегося сигнала.  
По оси ординат — угловое смещение, в град; отрицательные значения — смещение в сторону сигнала, положительные — в обратную сторону. Остальные обозначения см. рис. 3.

С ростом задержки величина сдвига уменьшается с последующей сменой знака на противоположный. Для ближней траектории величина сдвига связана с направлением движения сигнала. При движении сигнала в сторону маскира (черные треугольники) сдвиг нарастал с увеличением задержки. При удалении сигнала от маскира (светлые треугольники) он достигал максимума на задержке 18 мс, а затем резко уменьшался.

Согласно результатам двухфакторного анализа для задержек от 1 до 12 мс с факторами *Направление движения* (приближение к прямому сигналу/удаление от прямого сигнала) и *Траектория* (дальняя)/(ближняя) не было получено значимых различий для факторов: *Направление* ( $F(1.7) = 0.04, p > 0.05$ ) и *Траектория* ( $F(1.7) = 0.16, p > 0.05$ ). Кроме того, не выявлены достоверные взаимодействия между этими факторами ( $F(1.7) < 0.61, p > 0.05$ ). Таким образом, при задержках 1–12 мс субъективное смещение маскира в сторону сигнала для четырех условий предъявления сигнала не обнаруживало различий.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эффект предшествования при использовании неподвижных сигналов характеризуется взаимным влиянием прямого (опережающего) и задержанного сигналов, которое проявляется в смещении локализации задержанного сигнала в сторону прямого звука, а прямого звука в сторону задержанного сигнала. Подобная картина наблюдается в основном вблизи порога подавления задержанного сигнала, составляющей порядка 5–8 мс [5, 6]. Близкие значения порога (6–7 мс) были получены при использовании движущегося сигнала [9]. Как было показано, величина порога при пе-

ремещении сигнала по ближней и дальней траекториям не зависит от направления движения сигнала. Кроме того, если задержанный сигнал подавался от неподвижного источника, величина порога возрастала с сокращением расстояния между источниками. Для движущегося источника такие изменения порога не наблюдались.

Сдвиги субъективной локализации сигналов при действии нескольких источников звука обнаруживаются также в условиях маскировки. Такие сдвиги наблюдались при как использовании речевых [12], так и неречевых сигналов [13].

В данной работе начальные точки субъективной траектории, вне зависимости от ее расположения и направления движения сигнала, смещались по направлению движения сигнала, а конечные точки — в противоположную сторону. Субъективный сдвиг начальной точки сигнала может объясняться явлением временной маскировки. При последовательном включении двух сигналов опережающий сигнал на короткое время подавляет действие последующего сигнала [8]. В случае эффекта предшествования это подавление усиливается в силу взаимной корреляции двух сигналов. С увеличением задержки между сигналами степень взаимной корреляции падает и эффект ослабляется.

При временной маскировке эффект смещения начальных точек по направлению движения сигнала возникает независимо от того, где находится источник сигнала и в каком направлении он движется. Испытуемые начинают воспринимать начало движения сигнала уже после того, как реальный сигнал сместился на 30–60% от его полной траектории. С увеличением задержки между стимулами маскировка начала движения сигнала постепенно снижается. При этом субъективное положение начальной точки смещается к началу физической траектории движения сигнала, а длина субъективной траектории движения сигнала постепенно увеличивается (рис. 3, А). Вместе с тем свойства временной маскировки не позволяют объяснить разницу в величине смещения начальных точек, наблюдаемую при смене траектории и направления движения сигнала. При удалении сигнала от маскира субъективный сдвиг начальной точки больше при движении сигнала по дальней траектории, тогда как при приближении сигнала к маскеру максимальный сдвиг наблюдается для ближней траектории.

Как было показано, длина субъективной траектории движения сигнала остается постоянной, независимо от положения траектории и направления движения сигнала. Такое постоянство обеспечивается противоположными по знаку и величине сдвигами начальной и конечной точки

воспринимаемого движения сигнала. Большему сдвигу начальной точки в направлении движения сигнала соответствует меньший сдвиг конечной точки, направленный в обратную сторону. Соответственно, меньший сдвиг начальной точки сочетается с большим сдвигом конечной точки. Для ближней траектории движение сигнала в сторону удаления от маскира воспринимается с меньшим сдвигом начальной точки и большим обратным сдвигом конечной точки, тогда как движение сигнала в направлении маскира воспринимается с большим сдвигом начальной точки и меньшим сдвигом конечной точки. Нетрудно заметить, что в обоих случаях положение субъективной траектории движения сигнала оказывается сдвинутым в сторону расположения маскира. Иная картина наблюдается при движении сигнала по дальней траектории. При удалении сигнала от маскира большой сдвиг начальной точки сочетается с малым сдвигом конечной точки, а при движении сигнала в сторону маскира малый сдвиг начальной точки сопровождается большим сдвигом конечной точки. В результате этих сдвигов субъективная траектория оказывается смещенной в противоположную от маскира сторону для обоих направлений движения сигнала. Наблюдаемые изменения в относительном положении субъективной траектории в зависимости от их расстояния до маскира указывают на связь этих явлений с пространственной маскировкой.

В отличие от временной маскировки, проявляющейся в начале действия сигналов, пространственная маскировка действует на всем протяжении звуковой стимуляции. К основным ее свойствам относится зависимость уровня взаимодействия сигналов от расстояния между источниками. Взаимодействие возрастает при сближении источников и уменьшается при их разнесении [13–15]. В силу инерционных свойств слуховой системы локализация источника звука производится посредством средневзвешенной оценки информации в определенном временном окне [11]. Результат такой оценки определяется весовым соотношением сигналов, приходящих от разных источников. Для движущихся сигналов размер временного окна составляет величину порядка 100–200 мс [16]. Для близко расположенных источников сигнала и маскира их нервные представления в слуховой системе сильно перекрываются. В силу близости представительства пространственные оценки сигнала изменяются под действием информации, поступающей от маскира. Аналогично, в области представительства маскира оценки смещаются под влиянием информации, приходящей от сигнала. На перцептивном



уровне это выражается в сдвиге субъективной траектории движения сигнала в сторону локализации маскера и одновременном сдвиге субъективной локализации маскера в сторону расположения сигнала. Выраженность сдвига изменяется с изменением расстояния между источниками маскера и сигнала. При движении сигнала по дальней траектории влияние маскера ослабляется. На локализации сигнала это сказывается в виде смещения субъективной траектории движения сигнала в сторону удаления от маскера. Аналогичные явления можно наблюдать в изменениях субъективной локализации маскера. Сдвиг в сторону сигнала слабо выражен при движении сигнала по дальней траектории и существенно возрастает при движении сигнала по ближней траектории (рис. 5). В последнем случае величина сдвига изменяется с изменением направления движения сигнала: он увеличивается в условиях приближения сигнала к маскеру и уменьшается при удалении сигнала от маскера. При использовании дальней траектории движения сигнала такое явление отсутствует.

При введении задержки между маскером и сигналом выключение маскера происходит раньше выключения сигнала. Концепция временного окна позволяет представить, как задержка между выключениями стимулов может сказываться на субъективной локализации конечной точки движения сигнала. В окно, приложенное к концу сигнала, попадает весь конечный участок сигнала и часть конечного участка маскера, сокращенная на величину задержки. Оценка, производимая окном, зависит от весового соотношения сигнала и маскера, связанного с соотношением длительностей сигнала и маскера. С ростом задержки участок перекрытия стимулов в окне сокращается, а относительный вес сигнала возрастает. В результате по мере увеличения задержки конечная точка субъективной траектории движения сигнала постепенно смещается к концу физической траектории сигнала (рис. 3).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При предъявлении неподвижного маскера и движущегося сигнала в условиях эффекта предшествования наблюдается смещение субъективного положения начальных и конечных точек траектории движения сигнала и положение воспринимаемой траектории движущегося сигнала. Начальные точки вне зависимости от расположения траектории и направления движения смещаются по направлению движения сигнала. Конечные точки смещаются против направления движения. Воспринимаемая траектория движения сигнала укорачивается и смещается в сторону

маскера при движении сигнала по ближней траектории и в сторону удаления при движении по дальней траектории. Под действием движущегося сигнала воспринимаемое положение маскера смещается в сторону предъявления сигнала. Величина сдвига возрастает при движении сигнала по ближней траектории. Предполагается, что в основе сдвигов локализации сигнала и маскера лежат механизмы временной и пространственной маскировок.

**Этические нормы.** Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (Санкт-Петербург).

**Информированное согласие.** Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brown A.D., Stecker G.C., Tollin D.J. The precedence effect in sound localization // J. Assoc. Res. Otolaryngol. 2015. V. 16. № 1. P. 1.
2. Brown A.D., Jones H.G., Thakkar T. et al. Evidence for a neural source of the precedence effect in sound localization // J. Neurophysiol. 2015. V. 114. № 5. P. 2991.
3. Litovsky R.Y., Colburn H.S., Yost W.A., Guzman S.J. The Precedence effect // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106. № 4. Pt. 1. P. 1633.
4. Ege R., van Opstal A.J., Bremen P., van Wanrooij M.M. Testing the Precedence Effect in the Median Plane Reveals Backward Spatial Masking of Sound // Scientific Reports. 2018. V. 8. № 8670. P. 1.
5. Litovsky R.Y., Godar S.P. Difference in precedence effect between children and adults signifies development of sound localization abilities in complex listening tasks // J. Acoust. Soc. Am. 2010. V. 128. № 4. P. 1979.
6. Litovsky R.Y., Shinn-Cunningham B.G. Investigation of the relationship among three common measures of precedence: Fusion, Localization dominance, and discrimination suppression // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. № 1. P. 346.
7. Shinn-Cunningham B.G., Zurek P.M., Durlach N.I. Adjustment and discrimination measurements of the precedence effect // J. Acoust. Soc. Amer. 1993. V. 93. № 5. P. 2923.
8. Блауэрт И. Пространственный слух. М.: Энергия, 1979. С. 150.

9. Агаева М.Ю. Влияние расположения движущегося и неподвижного эхо-сигнала на их подавление // Физиология человека. 2018. Т. 44. № 6. С. 49.
10. Альтман Я.А., Романов В.П., Шахматов С.А. Особенности бинаурального освобождения от маскировки при движении звукового образа // Физиология человека. 1982. Т. 8. № 4. С. 537.
11. Carlile S., Leung J. The perception of Auditory Motion // Trends in Hearing. 2016. V. 20. P. 1.
12. Hartung K., Braasch J. Localization of distracted speech and noise in reverberant and anechoic environments // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 105. № 2. P. 1149.
13. Wightman F.L., Kistler D.J. Sound localization in the presence of multiple distracters // J. Acoust. Soc. Am. 1997. V. 101. P. 3105.
14. Perrott D.R. Concurrent minimum audible angle: Re-examination of the concept of auditory spatial acuity // 1984. J. Acoust. Soc. Am. V. 75. № 4. P. 1201.
15. Ebata V., Sone N., Nimura T. On the perception of direction of echo // J. Acoust. Soc. Am. 1968. V. 44. № 2. P. 542.
16. Альтман Я.А. Пространственный слух. СПб.: Ин-т физиологии им. И.П. Павлова РАН, 2011. 311 с.

## Masker–Signal Interaction in a Localization Task with a Moving Sound Source under the Influence of Precedence Effect

M. Yu. Agaeva<sup>a,\*</sup>, N. I. Nikitin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*I.P. Pavlov Institute of Physiology RAS, St. Petersburg, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: agamu\_1@mail.ru*

The precedence effect refers to a group of auditory phenomena related to the ability to localize sound sources in reverberant environment. The precedence effect was investigated using a localization task in the free sound field. The signal consisted of a direct sound (lead) and a moving target sound (lag). Lead–lag delays ranged from 1 to 40 ms. The lead was always stationary ( $+15^\circ$ ). The moving lags traveled to or from the lead along two paths situated at two locations ( $-86^\circ \dots -52^\circ$  and  $-52^\circ \dots -18^\circ$ ). The subjects marked the start and end points of the trajectory of the moving sounds. Localization of the start and end points of the lag was compared with localization of the single source. It was found that the lead affected the start and end points of the lag trajectory. The shift depended on the direction of movement. The starting points were always shifted in the direction of motion of the lag. The end points were shifted in the opposite direction. The shifts were decreasing as the delay was increasing. The effect of the lag on the lead localization was small.

*Keywords:* precedence effect, moving sound source, threshold of echo suppression.