

УДК 612.821

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ МАСКИРОВКИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

© 2024 М. Ю. Агаева

*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН,
199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6**E-mail: agamu_1@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.07.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2023

Исследовано влияние маскера на локализацию звукового сигнала в вертикальной сагиттальной плоскости в условиях маскировки: одновременной и в парадигме эффекта предшествования. В первом случае неподвижные сигнал и маскер предъявлялись одновременно, во втором – начало сигнала сдвигалось относительно начала маскера. Величина сдвига (задержка) составляла 2, 4, 8, 20, 40, 80 и 200 мс. В качестве сигнала и маскера были использованы некоррелированные шумовые посылки с шириной полосы от 5 до 18 кГц. Длительность шумовых посылок – 1 с. Маскер всегда предъявлялся под углом 90° элевации (над головой слушателя), а сигнал из положения 7.5° элевации (перед слушателем относительно межушной линии). Воспринимаемое угловое положение сигнала в условиях маскировки сравнивалось с пространственными оценками того же сигнала при его изолированном предъявлении (без маскера), аналогично локализация маскера в условиях маскировки сравнивалась с воспринимаемым положением изолированного маскера (без сигнала). Показано, что под действием маскировки вероятность обнаружения сигнала уменьшалась. При задержках от 0 до 40 мс слушатели в основном показывали воспринимаемое положение маскера, которое было смещено в сторону сигнала независимо от величины задержки и достоверно отличалось от воспринимаемого положения одиночного маскера. Вероятность локализации сигнала при этих задержках составляла не больше 8%. При задержках от 80 мс и выше вероятность локализации сигнала увеличивалась и составляла 92% и выше. Воспринимаемое положение сигнала не зависело от величины задержки и достоверно не отличалось от положения одиночного сигнала.

Ключевые слова: вертикальная плоскость, локализация звукового сигнала, маскировка

DOI: 10.31857/S0235009224040048 **EDN:** ADFOZS

ВВЕДЕНИЕ

Маскировкой называется явление, заключающееся в ухудшении восприятия одного стимула (сигнал) в присутствии другого стимула (маскера) (Blauert, 1997). В обычной жизни человеку и животным часто приходится определять положение источника одного звука на фоне других. Решая эту задачу, слуховая система должна вычислить и разделить дирекционные признаки сигнала и маскера – угловое положение по горизонтали (азимут) и вертикали (элевация), а также расстояние до источника звука. В последние 20 лет появились работы, в которых было показано, что при одновременном предъявлении сигнала и маскера, расположенных в вертикальной сагиттальной плоскости, испытуемые локализуют один звуковой образ (ЗО) на основе взвешенного усреднения их угловых положений (Best et al., 2004; Bremen et al., 2010; Bentum et al., 2017). В вертикальной плоскости локализация

основана на изменениях в спектре сигнала. Изменения в спектре дирекционно зависимы и создаются ушными раковинами (Van Opstal et al., 2017; Yao et al., 2020). За счет отражения звуковых волн на бугорках и впадинах ушных раковин и их интерференции в зависимости от угла элевации происходят изменения в спектре сигнала в диапазоне от 4–5 кГц и выше. Если два сигнала звучат одновременно, то, помимо интерференции на ушных раковинах, происходит интерференция между сигналами. Как было показано в трех работах (Bremen et al., 2010; Bentum et al., 2017; Ege et al., 2018), если сигнал и маскер предъявить одновременно, то испытуемые локализуют один звуковой образ на основе средневзвешенного значения их угловых положений. Например, в работе (Ege et al., 2018) в качестве маскера использовалась широкополосная посылка гауссова шума (ширина полосы 0,5–20 кГц) длительно-стью 100 мс, а сигналом была шумовая посылка

с тем же амплитудно-частотным спектром длительностью 20 мс, повторенная 5 раз, что делало звучание сигнала похожим на звук зуммера. На основе полученных результатов было высказано предположение, что вследствие интерференции двух стимулов на ушных раковинах слуховая система не может разделить их дирекционные признаки (Bremen et al., 2010; Bentum et al., 2017). Однако полученные данные довольно противоречивы. В одной из работ было отмечено влияние пространственного разделения между сигналом и маскером на определение положения стимула (Bremen et al., 2010). В том случае, когда маскер и сигнал были разнесены в пространстве больше чем на 45° и предъявлялись одновременно, испытуемые показывали или положение сигнала, или положение маскера, несмотря на то, что их просили отмечать только сигнал и игнорировать маскер. Авторы (Bremen et al., 2010) назвали подобное распределение ответов бимодальным. Если сигнал и маскер были разнесены в пространстве на расстояние меньше 45° , бимодального распределения ответов не наблюдалось и испытуемые показывали средневзвешенное положение ЗО. Следовательно, слуховая система была способна частично выделить информацию, приходящую от двух стимулов, но этого было недостаточно, чтобы полностью отделить один стимул от другого и определить положение сигнала. Однако в последующих исследованиях (Bentum et al., 2017; Ege et al., 2018) влияние разделения стимулов на их восприятие в вертикальной плоскости не было получено. Например, в работе (Ege et al., 2018) наблюдалось, что при задержках меньше 40 мс слушатели показывали средневзвешенное положение ЗО вместо воспринимаемого положения маскера. В этом исследовании расстояние между сигналом и маскером менялось от 10° до 80° , и для всех расстояний между стимулами было получено средневзвешенное положение ЗО.

В исследовании (Johnson et al. 2015) было отмечено, что при внесении дополнительной низкочастотной модуляции в сигнал улучшалась его локализация. Однако в работе Бентума с соавторами (Bentum et al., 2017) не удалось обнаружить влияние частотной модуляции на восприятие сигнала.

Введение задержки, т.е. асинхронности начала двух сигналов (эффект предшествования), не приводило к улучшению локализации ни маскера, ни сигнала (Ege et al., 2018). Только при задержке более 320 мс слушатели локализовали прямой сигнал (маскер) в области его нахождения (Ege et al., 2018). В основе эффекта предшествования лежит механизм выделения дирекционной информации от первых звуковых волн, идущих прямо от источника звука (прямой звук), и подавления

дирекционной информации об отраженных звуковых волнах (эхо-сигналы), приходящих с некоторой задержкой (Brown et al., 2015). Однако, согласно имеющимся в литературе данным, проявление эффекта предшествования было слабее в вертикальной плоскости, чем в горизонтальной (Litovsky, et al., 1999; Dizon, Litovsky, 2004; Агаева, Альтман, 2009).

В целом взаимодействие сигнала и маскера в вертикальной плоскости остается малоизученным. Целью настоящей работы было изучение эффектов маскировки при большом разнесении маскера и сигнала (на 86°) относительно друг друга. В качестве сигнала и маскера использовались длительные (1 с) некоррелированные шумовые посылки с одинаковой огибающей. Такая комбинация стимулов моделирует звуки, приходящие от двух независимых источников со сходными частотно-временными характеристиками. Тем самым мы попытаемся ответить на вопрос, может ли слуховая система выделить дирекционные признаки из спектров маскера и сигнала для длительных шумовых стимулов, разнесенных на большое расстояние, а также оценить влияние задержки сигнала относительно маскера на локализацию.

МЕТОДИКА

Условия эксперимента и испытуемые. В исследовании участвовало 8 испытуемых (7 женщин и 1 мужчина). Все испытуемые были с нормальным слухом в возрасте от 20 до 42 лет. Исследование состояло из двух серий. Длительность каждой серии составляла 20–25 мин. В один день один испытуемый принимал участие в одной серии.

Эксперименты проводили в анэхоидной камере размером $3 \times 3 \times 4.5$ м. В камере установлена полукруглая поворотная дуга радиусом 1 м, на которой располагались 49 громкоговорителей (Visaton SC5.9) с близкими частотными характеристиками. Различия амплитудно-частотных характеристик громкоговорителей не превышали ± 4 дБ в полосе 0.2–18 кГц. Угловое расстояние между ними составляло 3.75° .

Дуга была установлена в вертикальной плоскости. Испытуемого располагали в кресле таким образом, что его сагиттальная плоскость совпадала с плоскостью дуги, и голова находилась в центре полукруглости дуги. Два крайних громкоговорителя, первый и последний, находились на уровне головы испытуемого. Координаты громкоговорителя, находящегося впереди напротив головы испытуемого, были 0° по азимуту относительно средней линии головы и 0° элевации относительно междушной линии (рис. 1а). Координаты

громкоговорителя, расположенного позади испытуемого, были 180° по азимуту относительно средней линии головы и 180° элевации относительно межушной линии. Голову испытуемого не фиксировали, но во время предъявления звуковых сигналов просили не двигаться и не менять положение головы относительно дуги.

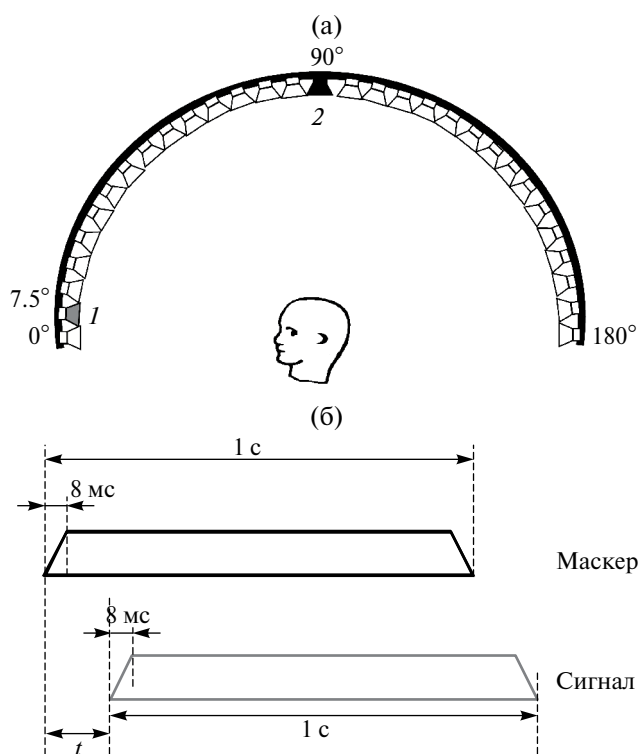


Рис. 1. Схема предъявления звуковых стимулов.

а — схема расположения источников звука относительно испытуемого: 1 — сигнал, 2 — маркер;

б — схематичное представление порядка предъявления маски и сигнала во времени;

t — задержка начала звучания сигнала относительно начала маски.

Стимулы. В качестве звукового сигнала использовались широкополосные шумовые посылы с частотной полосой — 5–18 кГц, синтезированные цифровым способом с частотой дискретизации 44.1 кГц. Снизу частотная полоса определялась фильтром, характеристики которого были подобраны таким образом, чтобы на 5 кГц заглушение составляло 100 дБ, а на 6 кГц — 0 дБ. Сверху частотная полоса сигнала была ограничена характеристиками динамиков на 18 кГц. Для экспериментов было синтезировано множество шумовых посылок с одинаковой полосой пропускания длительностью 12 с. Из них была выбрана пара посылок, у которых

коэффициент корреляции Спирмана был минимальным ($K_{\text{корр}} = 0,0003$). Одна посылка из этой пары использовалась как исходник для маскер, а другая — сигнал.

В основных экспериментальных сериях каждый звуковой стимул состоял из двух шумовых посылок длительностью по 1 с. Фронт нарастания-спада был 8 мс. Временная задержка между началами шумовых посылок составляла 0, 2, 4, 8, 20, 40, 80, 200 мс. Таким образом, шумовые посылки подавались либо одновременно, либо вторая сдвигалась относительно начала первой на величину задержки (см. рис. 1б). Далее первая шумовая посылка будет рассматриваться как маскер, а вторая — как сигнал. С помощью специально разработанного программного обеспечения из них в случайные моменты времени в каждой пробе формировались пары маскер-сигнал с заданной длительностью, фронтами и отставлением.

В естественных условиях обычно интенсивность отраженных сигналов (эхо-сигналов) меньше на 7–10 дБ, чем прямых (Litovsky et al., 1999), поэтому в наших экспериментах интенсивность маски составляла 54 дБ УЗД (уровень звукового давления), а сигнала — 45.3 дБ УЗД. Акустические измерения проводились с помощью аппаратуры Брюэль и Кьер (Дания) в точке расположения центра головы испытуемого.

Чтобы сравнить локализацию сигнала как в присутствии маски, так и без него, в каждую серию были включены контрольные пробы. В них испытуемым предъявлялся сигнал, идущий от одного источника, т.е. один сигнал без маски или один маскер без сигнала. Маскер всегда предъявлялся под углом 90° , а сигнал был расположен 7.5° элевации. Угловое расстояние между маскером и сигналом составляло 82.5° . Для предотвращения того, что испытуемые будут показывать только воспринимаемые положения сигнала и маски, также были добавлены 5 проб, в которых изолированный сигнал шел из положения 42, 78, 108, 138, 172° по элевации относительно средней линии по одной пробе для каждого положения сигнала. Эти 5 проб подавались в случайном порядке в течение одной серии.

В основных экспериментальных сериях испытуемые могли слышать либо сигнал и маскер, либо звуковой образ, который возникал, когда маскер и сигнал перцептивно сливались. Воспринимаемое положение ЗО могло располагаться в области нахождения маски, если дирекционная информация о положении сигнала полностью подавлялась, или ниже на дуге, если происходило взвешенное усреднение. Интенсивность маски была выше интенсивности сигнала на 8.87 дБ,

поэтому вклад маскера в взвешенное усреднение был больше, чем сигнала, и положение ЗО могло сместиться в сторону маскера. Испытуемого просили отмечать положение второго (отсроченного) сигнала, если он его слышит. В инструкции говорилось, что воспринимаемое положение стимулов будет меняться. В случае, если испытуемый слышал только один ЗО, он должен был указать воспринимаемое положение ЗО. В контрольных пробах испытуемый получал инструкцию определять положение единственного звучащего сигнала.

Процедура эксперимента. В начале каждого эксперимента проводилась предварительная тренировка длительностью 3–5 мин, в которой были использованы задержки 0, 2, 4, 8, 20, 40, 80, 200, 300, 600, 1200 мс. Тренировку всегда начинали с максимальной задержки 1200 мс. Все испытуемые при такой задержке слышали два последовательно звучащих стимула: первый – сверху дуги над головой, второй – впереди напротив головы испытуемого. Задержку последовательно уменьшали до 0 мс, затем меняли в случайном порядке от 0 до 1200 мс, а затем переходили к основной экспериментальной серии, в которой задержка изменялась в пределах от 0 до 200 мс. Во время тренировки у испытуемого после каждого предъявления стимула и получения ответа на него всегда спрашивали: сколько сигналов испытуемый слышал. Таким образом, в тренировочных экспериментах определялась картина того, как локализуются сигнал и ЗО.

В основной экспериментальной серии каждый стимул, состоящий из двух шумовых посылок с определенной задержкой, а также контрольные стимулы, состоящие из одной шумовой посылки, предъявляли по 2 раза с интервалом 1 с, после чего регистрировался ответ испытуемого. Если испытуемому было недостаточно двух раз для выполнения задания, по его просьбе стимул повторяли еще 2 раза. Ответы испытуемых регистрировали при помощи графического планшета Genius G-pen 450, на рабочей поверхности которого была схематически изображена дуга. После прослушивания звуковых стимулов испытуемый должен был спроецировать на схему воспринимаемое положение сигнала и затем отметить его на ней. Угловые координаты выбранных точек определялись автоматически с помощью специально разработанной компьютерной программы. Стимулы предъявлялись в 2 сериях. В каждой серии каждая задержка предъявлялась 12 раз, контрольные пробы предъявлялись в каждой серии также по 12 раз. Стимулы с разными задержками и контрольные пробы чередовались в псевдослучайном порядке.

Анализ данных. В контрольных пробах для каждого испытуемого было вычислено усредненное воспринимаемое положение изолированного сигнала и маскера. Для количественной оценки локализации сигнала в условиях маскировки была рассчитана “вероятность получения ответа на сигнал в присутствии маскера”, далее для краткости мы будем это называть вероятностью локализации. За “локализацию воспринимаемого положения сигнала” принимали пробы, в которых испытуемые показывали положение сигнала, не выходящее за пределы $\pm 2^{\circ}$ СО, где СО – стандартное отклонение от усредненного значения локализации изолированного сигнала для каждого испытуемого отдельно. В дальнейшем этот диапазон будет называться областью восприятия изолированного сигнала. Было определено процентное количество проб, в которых испытуемые локализовали сигнал от всего количества предъявленных проб для данной задержки, и была рассчитана вероятность его локализации в зависимости от задержки для каждого испытуемого. Вероятность 100% соответствовала тому, что во всех пробах испытуемые показывали воспринимаемое положение сигнала в области восприятия изолированного сигнала; менее 100% – слушатели локализовали сигнал только в некоторой части проб; 0% – испытуемые совсем не локализовали сигнал в области восприятия изолированного сигнала. Аналогичным образом рассчитывалась вероятность локализации маскера. Среднее воспринимаемое положение сигнала и маскера вычислялось по тому количеству проб, которое было отнесено к соответствующему типу по итогам классификации, и это количество различалось в разных условиях. Далее воспринимаемое положение сигнала и воспринимаемое положение маскера анализировалось по отдельности.

Воспринимаемое положение сигнала и маскера варьировало у разных испытуемых даже при предъявлении их по отдельности в контрольных пробах, поэтому для количественного анализа пространственных эффектов взаимодействия сигнала и маскера и унификации размерности были рассчитаны относительные единицы воспринимаемого положения ЗО или сигнала в каждой пробе по формуле:

$$Y/M_{cp} = Y_o, \quad (1)$$

где Y воспринимаемое угловое положение ЗО или сигнала в градусах элевации, M_{cp} – усредненное воспринимаемое угловое положение маскера у данного испытуемого при его изолированном предъявлении в контрольных пробах, а Y_o – воспринимаемое положение ЗО или сигнала в относительных единицах. Y_o рассчитывалось

для ответов в каждой пробе, индивидуально для каждого испытуемого. После такого преобразования 0 соответствовал началу дуги напротив испытуемого, а 1 — воспринимаемому положению маскира вверх над головой испытуемого в контрольных пробах. Воспринимаемое положение ЗО или сигнала в относительных единицах варьировало в пределах от 0 до 1 либо могло быть незначительно больше 1, если испытуемый локализовал ЗО выше или позади относительно воспринимаемого положения маскира в контрольных пробах.

Статистическую оценку данных проводили посредством дисперсионного однофакторного анализа, сравнивали положение изолированного сигнала и сигнала в условиях маскировки [фактор **условие** (сигнал без маскира, маскир + сигнал с задержкой 0, 2, 4, 8, 20, 40, 80 и 200 мс)] с поправкой Шеффе ($p < 0.05$), для ответов, сгруппированных в области воспринимаемого положения сигнала. Отдельно — для ответов, сгруппированных в области воспринимаемого положения маскира с фактором **условие** (маскир без сигнала, маскир + сигнал с задержкой 0, 2, 4, 8, 20, 40) с поправкой Шеффе ($p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В условиях маскировки ответы у шести из восьми испытуемых группировались либо в области расположения изолированного маскира, либо в области расположения изолированного сигнала. На рис. 2 приводится пример подобного распределения ответов на примере двух испытуемых — № 8 и № 5. Нижний пунктирный прямоугольник показывает область восприятия изолированного сигнала, а верхний — область восприятия изолированного маскира. Воспринимаемое положение сигнала и маскира показано на левой оси ординат. На рисунке показана кривая вероятности локализации сигнала, ее значения указаны на правой оси ординат. Как видно из рис. 2, у испытуемого № 8 количество проб, в которых он показывал воспринимаемое положение сигнала в области изолированного сигнала, составляло от 7 до 20% для задержек от 0 до 8 мс. При дальнейшем увеличении задержки количество проб, в которых испытуемый показывал положение сигнала, увеличивалось. Таким образом, для задержек от 0 до 20 мс испытуемый показывал в основном положение ЗО

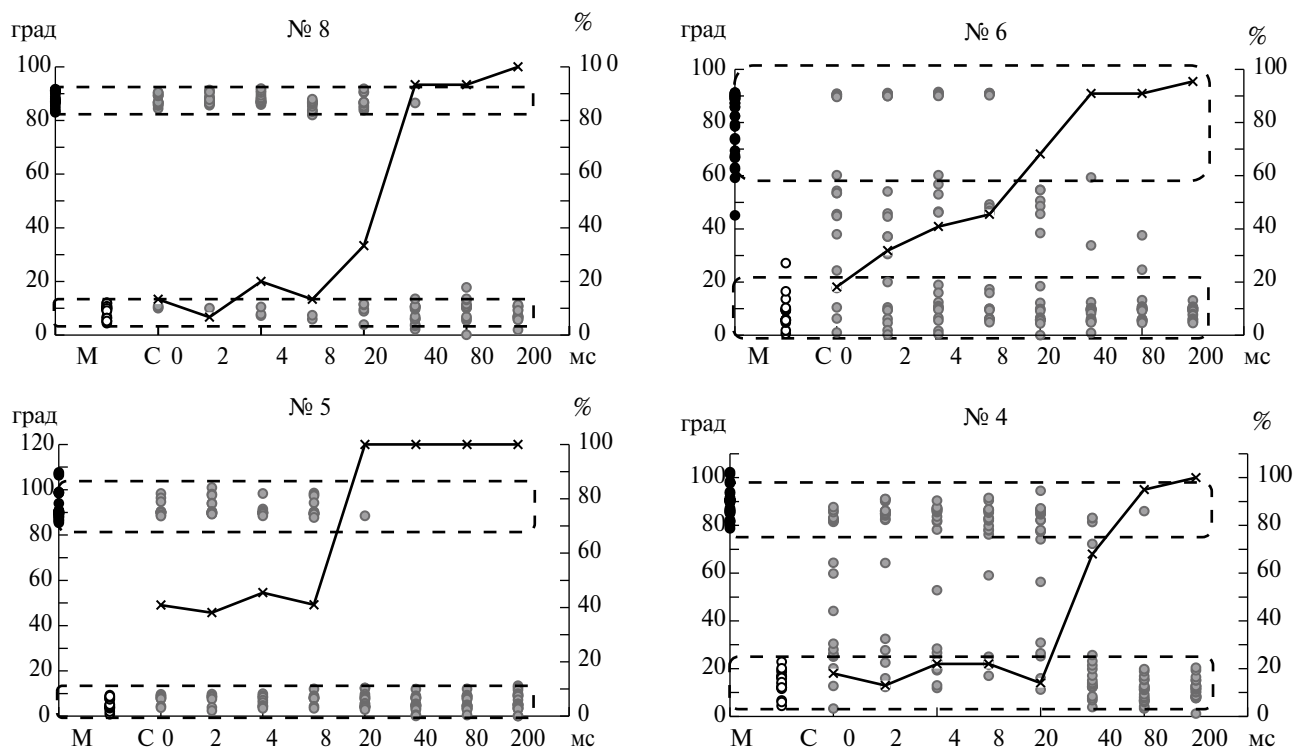


Рис. 2. Воспринимаемое положение звуковых стимулов в условиях маскировки и вероятность локализации сигнала для четырех испытуемых отдельно: по оси абсцисс — время задержки в мс; левая ось ординат — воспринимаемое положение звуковых стимулов в градусах; правая ось ординат — вероятность локализации сигнала, рассчитанная для каждой задержки; воспринимаемое положение одиночных стимулов, полученное в контрольных сериях, обозначено буквами С (положение сигнала) и М (положение маскира).

в области положения изолированного маскира, а при задержках от 40 мс и выше — воспринимаемое положение сигнала. Подобная картина наблюдалась у четырех слушателей из упомянутых выше шести испытуемых. У оставшихся двух из шести испытуемых ответы группировались в области изолированного сигнала в 40–54% проб для задержек от 0 до 4 мс, и 95–100% при задержке 20 мс. В качестве примера подобного распределения ответов на рис. 2 приведено распределение ответов у испытуемого № 5. Как видно из рисунка, ответы испытуемого также группировались либо в области расположения изолированного маскира, либо в области изолированного сигнала, как и у испытуемого № 8.

У оставшихся двух из восьми испытуемых наблюдались ответы в области, расположенной между положением изолированного сигнала и изолированного маскира. У одного испытуемого ответы группировались в большей степени в области расположения маскира, в меньшей — в области сигнала, а некоторая часть ответов была расположена между воспринимаемыми положениями изолированного сигнала и маскира (на рис. 2 — испытуемый № 4). У второго испытуемого (на рис. 2 — испытуемый № 6) ответы были диффузно распределены между воспринимаемыми положениями изолированного сигнала и маскира при задержках от 0 до 40 мс (на рис. 2 — испытуемый № 6). В анализе данных полученные значения испытуемого № 6, у которого наблюдалось диффузное распределение ответов, не учитывались. Таким образом, полученные данные отражают большие межиндивидуальные различия в локализации сигнала в условиях маскировки.

Для унификации размерности были рассчитаны относительные единицы. На рис. 3а показана диаграмма рассеяния ответов в относительных единицах по семи испытуемым. На рисунке область воспринимаемого положения изолированного маскира показана кружками серого цвета, а изолированного сигнала — кружками белого цвета. Как видно из рисунка, в условиях одновременной маскировки и при задержках начала звучания сигнала относительно начала маскира от 2 до 8 мс большая часть ответов группировалась в области расположения изолированного маскира, а меньшая — в области расположения изолированного сигнала. Начиная с задержки 20 мс, большая часть ответов группировалась в области расположения сигнала. Лишь незначительная часть ответов располагалась в промежуток между сигналом и маскером, выходя за пределы диапазона двух стандартных отклонений вокруг среднего значения изолированного сигнала или маскира. Такие ответы в дальнейшем

анализе не учитывались. Воспринимаемое положение 3О в области расположения маскира рассчитывалось для задержек до 40 мс включительно, для задержек от 80 мс и выше не вычислялось по причине недостаточного количества данных. На рис. 3б показана усредненная по семи испытуемым кривая вероятности локализации сигнала. Как видно из рисунка, на задержках более 80 с вероятность локализации сигнала достигает 92%-ного уровня.

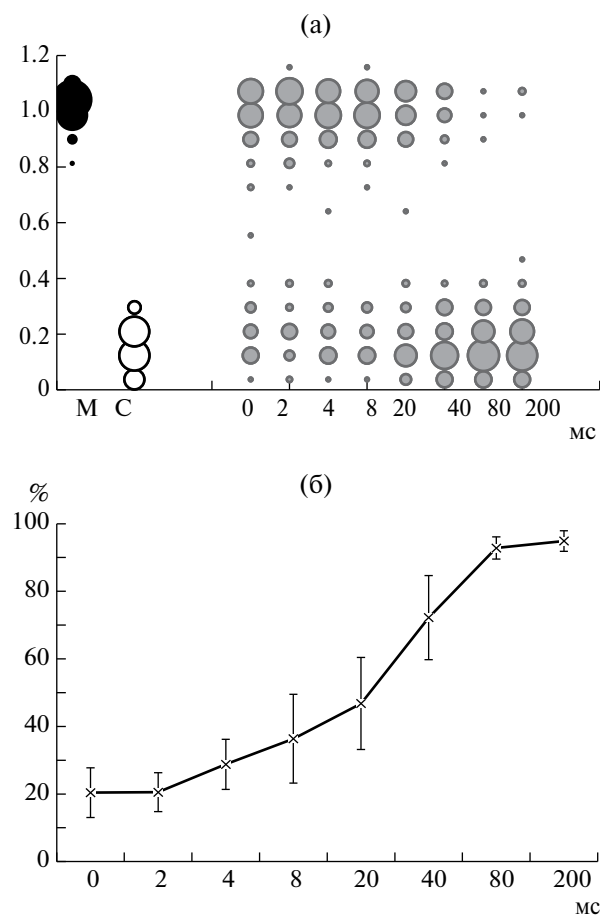


Рис. 3. Распределения ответов по всем испытуемым в зависимости от задержки: а — распределение ответов в относительных единицах в пузырьковой диаграмме; б — вероятность локализации сигнала; по оси абсцисс — время задержки в мс; по оси ординат — 3а воспринимаемое положение звуковых стимулов в град в относительных единицах; 3б — вероятность локализации сигнала, рассчитанная в процентах, относительно общего количества проб; условные обозначения — как на рис. 2; вертикальные линии — стандартная ошибка среднего.

На рис. 4а показано усредненное по семи испытуемым воспринимаемое положение 3О в области расположения маскира (в относительных единицах). Воспринимаемые положения 3О в условиях маскировки для задержек от 0 до 40 мс

лежат почти на одном уровне, незначительно ниже значений воспринимаемого положения изолированного маскера, что соответствует смещению воспринимаемого положения маскера в сторону сигнала. Сравнение воспринимаемых положений ЗО в области расположения маскера в условиях маскировки и изолированного маскера проводилось для задержек от 0 до 40 мс, так как при задержках от 80 мс и выше воспринимаемое ЗО в среднем по 7 испытуемым составляло меньше 7% от всех проб. Сравнение относительных значений при помощи однофакторного дисперсионного анализа показало зависимость воспринимаемого положения от условия стимуляции ($F(6, 735) = 13.071$, $p < 0,01$). Парные сравнения выявили достоверные различия ($p < 0,05$) между величинами воспринимаемого положения изолированного маскера от воспринимаемых положений ЗО в условиях маскировки для всех использованных при сравнении задержек. Между величинами воспринимаемого положения ЗО в области расположения маскера при разных задержках различий не наблюдалось ($p > 0,05$).

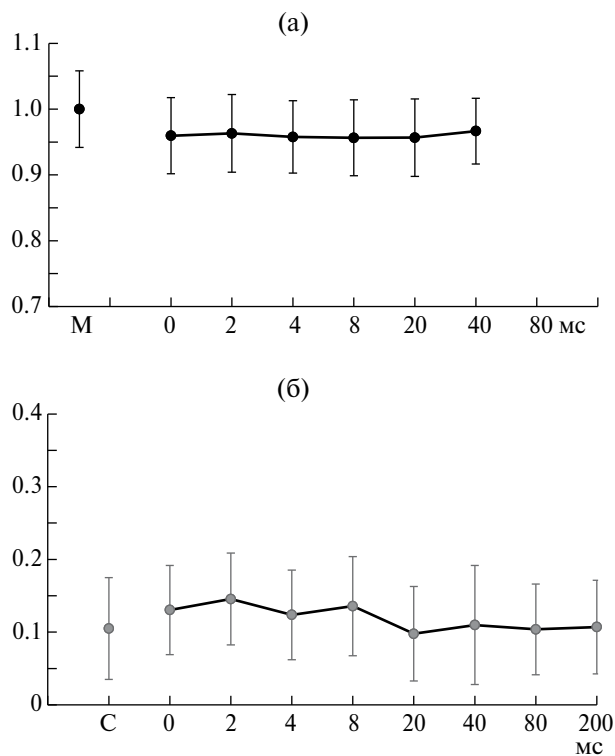


Рис. 4. Усредненное значение положения стимулов по 7 испытуемым: а – воспринимаемое положение ЗО в области расположения маскера; б – сигнала; по оси абсцисс – время задержки в мс; по оси ординат – воспринимаемое положение звуковых стимулов в относительных единицах; вертикальные линии – стандартное отклонение; условные обозначения – как на рис. 2.

На рис. 4б показано усредненное по всем испытуемым воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки для всех задержек от 0 до 200 мс (серые кружочки) и в условиях предъявления изолированного сигнала (отдельный кружок). Как видно из рисунка, при одновременной маскировке (задержка 0 мс) и при задержках от 2 до 8 мс воспринимаемое положение сигнала немного выше воспринимаемого положения изолированного сигнала, а при задержках от 20 мс и выше они почти не различаются. Согласно однофакторному статистическому анализу, воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки для всех задержек и воспринимаемое положение изолированного сигнала не показало достоверных различий ($F(8, 741) = 1.85$, $p = 0,064$). Парные сравнения также не показали значимых различий между воспринимаемым положением изолированного сигнала и сигнала в условиях маскировки, а также между воспринимаемыми положениями сигналов в зависимости от задержки сигнала относительно маскера. В отличие от воспринимаемого положения ЗО, воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки находилось в области изолированного сигнала в данных экспериментальных условиях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ухудшение локализации звуковых стимулов в условиях маскировки проявлялось в уменьшении вероятности получения ответа на сигнал в присутствии маскера. Наши результаты показывают, что при задержках до 40 мс задача разделить в пространстве сигнал и маскер, расположенные в сагиттальной плоскости, и локализовать сигнал вызывала затруднения у испытуемых. Начиная с задержки 40 мс и выше, процент проб, в которых испытуемые показывали сигнал в области локализации изолированного сигнала, увеличился от 72% и выше (см. рис. 3б). Это подтверждают данные исследования (Ege et al., 2018), где было показано, что для задержек до 40 мс сигнал и маскер одинаковой интенсивности сливались в один ЗО в вертикальной плоскости, который локализовался на основе средневзвешенного значения их угловых положений. Длительность маскера и сигнала была 100 мс. При увеличении задержки количество проб, в которых наблюдалась локализация, основанная на взвешенном усреднении, постепенно уменьшалась и полностью прекращалось при задержках больше 160 мс (Ege et al., 2018). В нашей работе при задержке 80 мс испытуемые могли пространственно разделить сигнал и маскер и локализовать сигнал с вероятностью 90% (см. рис. 3б). В нашей работе сигнал и маскер были некоррелированными

шумовыми посылками длительностью 1 с и по звучанию были похожи. Можно предположить, что некоррелируемые сигнал и маскер и большая длительность стимулов в нашем эксперименте облегчала задачу слуховой системы выделить сигнал из комплекса “сигнал + маскер”, т.е. решить, что приходит от одного источника, а что — от разных источников. Предположение о том, что сегрегация звукового потока может зависеть от продолжительности звука, высказывал Брегман (Bregman, 1990).

В отличие от вертикальной плоскости, в горизонтальной плоскости локализация сигнала при маскировании некоррелированным маскером при большом пространственном разнесении стимулов не вызывала затруднений у всех испытуемых, независимо от задержки (Агаева, Петропавловская, 2023). По-видимому, это обусловлено различными признаками локализации, осуществляемой в вертикальной плоскости за счет интерференции звуковых волн на ушных раковинах, а в горизонтальной — за счет бинауральных различий по времени или интенсивности (Yost, Dorman, 2020). Точная локализация в вертикальной сагиттальной плоскости требует нескольких десятков миллисекунд акустической стимуляции (Vliegen, Van Opstal, 2004; Dizon, Litovsky, 2004), в отличие от локализации в горизонтальной плоскости, где для локализации достаточна длительность стимула в 1 мс. Если предполагать, что для локализации одиночного источника в вертикальной плоскости требуется несколько десятков миллисекунд, то для локализации сигнала в условиях маскировки требуется как минимум столько же времени или больше.

Воспринимаемое положение ЗО, возникающее, когда маскер и сигнал перцептивно сливались, находилось немного ниже области воспринимаемого положения маскера, т.е. было смещено в сторону сигнала (рис. 4а). Нельзя исключать возможность того, что испытуемые могли показывать воспринимаемое положение сигнала рядом с положением маскера, а не воспринимаемое положение ЗО. Это могло повлиять на усредненный результат. Однако, при всех задержках от 0 до 40 мс положение ЗО статистически не различалось. Это косвенно свидетельствует о том, что испытуемые показывали в основном воспринимаемое положение ЗО. Поскольку с увеличением длительности задержки количество проб, в которых испытуемые показывали сигнал вблизи маскера, будет различным. Косвенным подтверждением того, что при задержках до 40 мс маскер и сигнал одинаковой интенсивности сливаются в один ЗО, являются данные, полученные в работе Иджа с коллегами (Ege et al., 2018), где слушатели показывали средневзвешенное

положение ЗО для задержек до 40 мс, а не маскер и не сигнал. Было выдвинуто предположение, что в вертикальной сагиттальной плоскости при действии стимула (“маскер + сигнал”) наблюдается действие обратной маскировки (Ege et al., 2018). Феномен обратной маскировки состоит в том, что при последовательном предъявлении двух сигналов с небольшим интервалом между ними второй сигнал маскирует первый. Можно предположить, что в нашем случае сигнал, поданный с небольшой задержкой относительно начала звучания маскера, влияет на его воспринимаемое положение.

Воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки достоверно не отличалось от положения изолированного сигнала (см. рис. 4б). Можно отметить небольшую тенденцию: при задержках от 0 до 8 мс воспринимаемое положение было немного выше изолированного сигнала, т.е. немного смещено в сторону маскера. При дальнейшем увеличении задержки воспринимаемое положение, усредненное по группе испытуемых, было либо немного ниже, либо равно усредненному по группе испытуемых значению изолированного сигнала (см. рис. 4б). Можно предположить, что сигнал, находящийся в области “наилучшей” локализации, имел больший вес, чем маскер, расположенный над головой.

Нами получены сильные межиндивидуальные различия (см. рис. 2). Большие индивидуальные различия были отмечены также и в других исследованиях (Ege et al., 2018; Bremen et al., 2010). В первом исследовании (Ege et al., 2018) отмечалось, что полученное воспринимаемое положение ЗО имело большую вариабельность: стандартное отклонение среднего положения ЗО было приблизительно в 3 раза больше, чем при локализации изолированного маскера. Во второй работе (Bremen et al., 2010) испытуемые разделились на две группы при одновременном предъявлении сигнала и маскера одинаковой интенсивности в вертикальной плоскости, разнесенных в пространстве больше чем на 45°. У одной группы испытуемых наблюдалось средневзвешенное воспринимаемое положение ЗО. В другой группе испытуемые локализовали либо сигнал, либо маскер (Bremen et al., 2010). Можно предположить, что за счет интерференции сигнала и маскера на ушных раковинах воспринимаемое положение становилось более “размытым” в пространстве, или что за счет интерференции возникал новый сигнал с новым спектром (Bremen et al., 2010). Вероятно, слуховая система сравнивает полученный спектр с имеющейся копией на основе взаимной корреляции (Hofman, Van Opstal, 1998; Bremen et al., 2010; Zonooz et al., 2019), или сравнивает только определенные спектральные

производные для конкретных частот (Zonoos et al., 2019; Baumgartner et al., 2014). Предполагается, что определение спектра сигнала происходит уже на уровне дорсального кохлеарного ядра, а стадия вычисления взаимной корреляции полученного спектра с имеющимся копиями на уровне среднего мозга (Zonoos et al., 2019). Возможно, из-за неопределенности, возникающей вследствие интерференции, слуховая система при сравнении шаблона и полученного нового спектра подбирает наиболее вероятное воспринимаемое положение, которое может меняться от одной пробы к другой. Например, как полученное нами распределение ответов у испытуемых № 6 и № 4 (см. рис. 2). Однако все полученные результаты нельзя объяснить только интерференцией звуковых волн на ушных раковинах. Можно предположить, что нейронные взаимодействия внутри тонотопически организованных слуховых путей также влияют на локализацию сигнала в условиях маскировки (Best et al., 2005; Lee et al., 2009). Результатом этого взаимодействия является “притягивание ЗО” к сигналу.

ВЫВОДЫ

При расположении не коррелируемых стимулов длительностью 1с в сагиттальной плоскости (сигнала и маскира — 7,5 и 90 град по элевации относительно межшумной линии, соответственно) наблюдалось подавление пространственных признаков сигнала маскером, которое проявлялось в уменьшении вероятности получения ответа на сигнал в присутствии маскира. Вероятность получения ответа (локализации сигнала в области его расположения) для задержек от 0 до 40 мс составляла не больше 8%. При задержках больше 80 вероятность локализации сигнала была от 90% и выше.

Воспринимаемое положение ЗО в который маскер и сигнал перцептивно сливались в условиях маскировки не зависело от величины задержки (от 0 до 40 мс) и было расположено немного ниже положения изолированного маскира. Положение ЗО достоверно отличалось от воспринимаемого положения изолированного маскира. Воспринимаемое положение сигнала в условиях маскировки в отличие от маскира не зависело от величины задержки (от 0 до 200 мс).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН (№ 1021062411653—4—3.1.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаева М. Ю., Альтман Я. А. Пороги обнаружения эха для серии шумовых посылок в вертикальной сагиттальной плоскости. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 3 С. 181—185.
- Агаева М. Ю., Петропавловская Е. А. Локализация в горизонтальной плоскости коррелированных и некоррелированных звуковых сигналов в условиях маскировки. *Физиология человека*. 2023. Т. 49. № 1. С 52—63. DOI: 10.31857/S0131164622700138
- Baumgartner R., Majdak P. Laback B. Modeling sound-source localization in sagittal planes for human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2014. V. 136. P. 791—802. DOI 10.1121/1.4887447.
- Van Bentum G. C., Van Opstal A. J., Van Aartrijk C. M. M., Van Wanrooij M. M. Level-weighted averaging in elevation to synchronous amplitude-modulated sounds. *J Acoust Soc Am*. 2017. V.142. P. 3094—3103. DOI: 10.1121/1.5011182
- Best V., van Schaik A., Carlile S. Separation of concurrent broadband sound sources by human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2004. V. 115. P. 324—336. DOI: 10.1121/1.1632484
- Blauert J. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. Harvard, MA: MIT Press, 1997 504 p.
- Bregman A. S. *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990. 792 p.
- Bremen P., Van Wanrooij M. M., Van Opstal A. J. Pinna cues determine orienting response modes to synchronous sounds in elevation. *J. Neurosci*. 2010. V. 30. P. 194—204. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2982—09.2010
- Brown A. D., Stecker G. C., Tollin D. J. The precedence effect in sound localisation. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2015. V. 16. P. 1—28. DOI: 10.1007/s10162—014—0496—2
- Dizon R. M., Litovsky R. Y. Localisation dominance in the median-sagittal plane: effect of stimulus duration. *J. Acoust. Soc. Am*. 2004. V. 115. P. 3142—3155. DOI: 10.1121/1.1738687
- 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. *Sci Rep*. 2018. V. 8:8670. P. 1—10. DOI:10.1038/s41598—018—26834—2
- Johnson O. S., O'Connor K.N., Sutter M. Segregating two simultaneous sounds in elevation using temporal envelope: Human psychophysics and a physiological model. *J. Acoust. Soc. Am*. 2015. V. 138. № 1. P 33—43. DOI: 10.1121/1.4922224
- Lee A. K., Deane-Pratt A., Shinn-Cunningham B. G. Localization interference between components in an auditory

- scene. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. P. 2543–2555. DOI: 10.1121/1.3238240
- Litovsky R. Y., Colburn H. S., Yost W. A., Guzman S. J. The precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1633–1654. DOI: 10.1121/1.427914
- Van Opstal A. J., Vliegen J., Van Esch T. Reconstructing spectral cues for sound localisation from responses to rippled noise stimuli. *Plos One*. 2017. V. 12. № 3. P. e0174185. DOI: 10.1371/journal.pone.0174185
- Vliegen J., Van Opstal A. J. The influence of duration and level on human sound localisation. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 1705–1713. DOI: 10.1121/1.1687423
- Yao D., Li J., Xia R., Yan Y. The role of spectral cues in vertical plane elevation perception. *Acoust. Sci. & Tech.* 2020. V. 41. № 1. P. 435–438. DOI: 10.1250/ast.41.435
- Yost W. A., Pastore M. T., Dorman M. F. Sound source localization is a multisystem process. *Acoust Sci Technol*. 2020. V. 41. P. 113. DOI: 10.1250/ast.41.113

LOCALIZATION OF A SOUND SIGNAL IN THE VERTICAL PLANE UNDER MASKING CONDITIONS

M. Yu. Agaeva

I.P. Pavlov Institute of Physiology RAS199034, St. Petersburg, Makarova emb., 6

E-mail: agamu_1@mail.ru

The effect of masker on the localization of a sound source in vertical sagittal plane was investigated in simultaneous masking conditions and in the precedence effect paradigm. In the first case, the stationary signal and the masker were presented simultaneously while in the second case the signal onset was delayed relative to the masker onset. The delay was 2, 4, 8, 20, 40, 80 and 200 ms. The signal and the masker were created from two different uncorrelated noise bursts with a bandwidth of 5 to 18 kHz. Duration of noise bursts were 1 s. The masker was placed above the listeners head at an angle of 90 deg and the signal was placed in front of the listener at an angle of 7.5 deg. Perceived positions of signals under masking conditions were compared with those single of the signal or masker presented separately. It is shown that under the masking conditions the probability of detecting a signal decreased. Listeners could localize the signal at the delay of 80 ms and higher. The probability of detecting the signal at 80 ms delay was 92%. The perceived position of signal in masking condition did not significantly differ from the perceived position of single signal. At delays ranging from 0 to 40 ms, listeners mainly showed a perceived masker position that was shifted toward the signal. The shifted position was significantly different from the perceived position of a single masker.

Keywords: vertical plane, sound signal localization, masking

REFERENCES

- Agaeva M. Ju., Al'tman Ja. A. Porogi obnaruzheniya jeha dlja serii shumovyh posylok v vertikal'noj sagittal'noj ploskosti [Echo Threshold Value for Series of Noise Bursts in Vertical Plane]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2009. V. 23(3). P. 181–185. (in Russian).
- Agaeva M. Yu., Petropavlovskaja E. A. Localization of Correlated and Uncorrelated Audio Signals in the Horizontal Plane under Masking Conditions. *Human Physiology*. 2023. V. 49. № 1. P. 44–54. DOI: 10.1134/S0362119722100012
- Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling sound-source localization in sagittal planes for human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2014. V. 136. P. 791–802. DOI: 10.1121/1.4887447.
- Van Bentum G. C., Van Opstal A. J., Van Aartrijk C. M. M., Van Wanrooij M. M. Level-weighted averaging in elevation to synchronous amplitude-modulated sounds. *J Acoust Soc Am*. 2017. V. 142. P. 3094–3103. DOI: 10.1121/1.5011182
- Best V., van Schaik A., Carlile S. Separation of concurrent broadband sound sources by human listeners. *J Acoust Soc Am*. 2004. V. 115. P. 324–336. DOI: 10.1121/1.1632484
- Blauert J. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. Harvard, MA: MIT Press., 1997. 504 p.
- Bregman A. S. *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Cambridge, MA: MIT Press.; 1990. 792 p.
- Bremen P., Van Wanrooij M. M., Van Opstal A. J. Pinna cues determine orienting response modes to synchronous sounds in elevation. *J. Neurosci*. 2010. V. 30. P. 194–204. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2982–09.2010
- Brown A. D., Stecker G. C., Tollin D. J. The precedence effect in sound localisation. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2015. V. 16. P. 1–28. DOI: 10.1007/s10162–014–0496–2
- Dizon R. M., Litovsky R. Y. Localisation dominance in the median-sagittal plane: effect of stimulus duration. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 3142–3155. DOI: 10.1121/1.1738687
- 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. *Sci Rep.* 2018. V. 8:8670. P. 1–10. DOI:10.1038/s41598-018-26834-2
- Johnson O. S., O'Connor K.N., Sutter M. Segregating two simultaneous sounds in elevation using temporal envelope: Human psychophysics and a physiological model. *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 138. № 1. P. 33–43. DOI: 10.1121/1.4922224
- Lee A. K., Deane-Pratt A., Shinn-Cunningham B. G. Localization interference between components in an auditory scene. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. P. 2543–2555. DOI: 10.1121/1.3238240
- Litovsky R. Y., Colburn H. S., Yost W. A., Guzman S. J. The precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1633–1654. DOI: 10.1121/1.427914
- Van Opstal A. J., Vliegen J., Van Esch T. Reconstructing spectral cues for sound localisation from responses to rippled noise stimuli. *Plos One.* 2017. V. 12. № 3. P. e0174185. DOI: 10.1371/journal.pone.0174185
- Vliegen J., Van Opstal A. J. The influence of duration and level on human sound localisation. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. P. 1705–1713. DOI: 10.1121/1.1687423
- Yao D., Li J.; Xia R., Yan Y. The role of spectral cues in vertical plane elevation perception. *Acoust. Sci. & Tech.* 2020. V. 41. № 1. P. 435–438. DOI: 10.1250/ast.41.435
- Yost W. A., Pastore M. T., Dorman M. F. Sound source localization is a multisystem process. *Acoust Sci Technol.* 2020. V. 41. P. 113. DOI: 10.1250/ast.41.113