



УДК 612.821

EDN YCNXHQ

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-198-212>

## Искажение субъективного пространства в динамической акустической среде

Д. А. Саликова<sup>✉1</sup>, Е. А. Петропавловская<sup>1</sup>, Л. Б. Шестопалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

### Сведения об авторах

Диана Алиевна Саликова, ResearcherID: [HTTP-5128-2023](https://orcid.org/0000-0003-1275-5454), ORCID: [0000-0003-1275-5454](https://orcid.org/0000-0003-1275-5454), e-mail: [SalikovaDA@infran.ru](mailto:SalikovaDA@infran.ru)

Екатерина Алексеевна Петропавловская, Scopus AuthorID: [6506489829](https://orcid.org/6506489829), ResearcherID: [J-6991-2018](https://orcid.org/J-6991-2018), ORCID: [0000-0001-8659-0096](https://orcid.org/0000-0001-8659-0096), e-mail: [petropavlovskajaie@infran.ru](mailto:petropavlovskajaie@infran.ru)

Лидия Борисовна Шестопалова, Scopus AuthorID: [6603432925](https://orcid.org/6603432925), ResearcherID: [J-5307-2018](https://orcid.org/J-5307-2018), ORCID: [0000-0002-5039-6395](https://orcid.org/0000-0002-5039-6395), e-mail: [shestopalovalb@infran.ru](mailto:shestopalovalb@infran.ru)

**Для цитирования:** Саликова, Д. А., Петропавловская, Е. А., Шестопалова, Л. Б. (2023) Искажение субъективного пространства в динамической акустической среде. *Интегративная физиология*, т. 4, № 2, с. 198–212. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-198-212> EDN YCNXHQ

**Получена** 11 апреля 2023; прошла рецензирование 16 июня 2023; принята 17 июня 2023.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Госпрограммы 47 ГП «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (2019–2030), тема 0134-2019-0006.

**Права:** © Д. А. Саликова, Е. А. Петропавловская, Л. Б. Шестопалова (2023). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

**Аннотация.** Были исследованы ответы здоровых взрослых испытуемых в психофизиологическом эксперименте на неподвижные и движущиеся звуковые образы (ЗО). Пространственные эффекты создавали за счет изменения межшумных различий по интенсивности. Движущиеся ЗО были результатом восприятия стимулов, содержащих движущийся фрагмент, заключенный между двумя стационарными участками. Локализацию начальных и конечных точек траекторий регистрировали при помощи графического планшета, на котором испытуемые отмечали субъективное восприятие точек. Наличие движущегося фрагмента приводило к расширению субъективного слухового пространства по сравнению с локализацией неподвижных ЗО. Этот эффект был сильнее выражен в периферической области, чем в центральной, в которой воспринимаемое положение начальных и конечных точек было незначительно смещено против направления движения. В свою очередь, эффект был выражен для начальных точек траектории сильнее, чем для конечных. Для начальных латеральных точек (при движении от ушей к центру) наблюдалось смещение воспринимаемого положения ЗО против направления движения на 10–13 градусов. Конечные точки при движении от центра к ушам были незначительно смещены в направлении движения. Скорость движения ЗО не влияла на искажение субъективного пространства.

**Ключевые слова:** пространственный слух, эффект искажения акустического пространства, латерализация звукового образа, межшумные различия по интенсивности, звуковые сигналы с отсроченным началом движения

# Distortion of human auditory space in a dynamic acoustic environment

D. A. Salikova<sup>✉1</sup>, E. A. Petropavlovskaja<sup>1</sup>, L. B. Shestopalova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

## Authors

Diana A. Salikova, ResearcherID: [HTP-5128-2023](https://orcid.org/0000-0003-1275-5454), ORCID: [0000-0003-1275-5454](https://orcid.org/0000-0003-1275-5454), e-mail: [SalikovaDA@infran.ru](mailto:SalikovaDA@infran.ru)

Ekaterina A. Petropavlovskaja, Scopus AuthorID: [6506489829](https://orcid.org/6506489829), ResearcherID: [J-6991-2018](https://orcid.org/J-6991-2018), ORCID: [0000-0001-8659-0096](https://orcid.org/0000-0001-8659-0096), e-mail: [petropavlovskaja@infran.ru](mailto:petropavlovskaja@infran.ru)

Lidia B. Shestopalova, ResearcherID: [J-5307-2018](https://orcid.org/J-5307-2018), Scopus AuthorID: [6603432925](https://orcid.org/6603432925), ORCID: [0000-0002-5039-6395](https://orcid.org/0000-0002-5039-6395), e-mail: [shestopalovalb@infran.ru](mailto:shestopalovalb@infran.ru)

**For citation:** Salikova, D. A., Petropavlovskaja, E. A., Shestopalova, L. B. (2023) Distortion of human auditory space in a dynamic acoustic environment. *Integrative Physiology*, vol. 4, no. 2, pp. 198–212. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-198-212> EDN [YCNXHQ](https://orcid.org/UCNXHQ)

**Received** 11 April 2023; reviewed 16 June 2023; accepted 17 June 2023.

**Funding:** The study was supported by the State Programme 47 GP ‘Scientific and Technological Development of the Russian Federation’ (2019–2030), Topic No. 0134–2019–0006.

**Copyright:** © D. A. Salikova, E. A. Petropavlovskaja, L. B. Shestopalova (2023). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under [CC BY-NC License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

**Abstract.** We investigated the psychophysical responses of healthy adult subjects listening to stationary and moving auditory stimuli. Spatial properties of sounds were created using linear changes of interaural level differences. The moving stimuli contained stationary initial and final fragments and a moving fragment embedded between them. The three fragments followed each other without a gap. The subjects indicated the perceived sound trajectories using a graphic tablet. It was shown that the presence of a moving fragment expanded the subjective auditory space compared to the localization of stationary sound signals. This effect was more pronounced at the periphery than near the head midline, and it was stronger for the initial points of the trajectory than for the final ones. When the sounds moved from the ears towards the center, the initial lateral points shifted by 10–13 degrees against the direction of movement. When the sounds moved from the center towards the ears, the final points of the trajectory slightly shifted in the direction of movement. The sound velocity had no effect on the distortion of auditory space.

**Keywords:** spatial hearing, distortion of auditory space, lateralization of sound image, interaural level differences, sound signals with delayed onset of motion

## Введение

Для успешной локализации источника звука в горизонтальной плоскости критически важными являются бинауральные признаки: межшумные различия по времени ( $\Delta T$ ) и интенсивности ( $\Delta I$ ). Способность определять положение источника звука в горизонтальной плоскости можно исследовать в свободном поле или дихотически, при использовании головных телефонов, изменяя бинауральные характеристики стимулов. В последнем случае звуковой образ (ЗО) локализуется внутри головы, а не во внешнем пространстве, и можно говорить о латерализации звукового образа. В данной работе для создания местоположения ЗО использовали межшумные различия по интенсивности.

Длительности сигнала менее миллисекунды достаточно для корректной локализации неподвижного источника звука (или латерализации ЗО), тогда как восприятие движения предпо-

лагает анализ изменения положения источника звука во временном интервале порядка 80–150 мс (Альтман 2011) или даже 150–300 мс (Grantham 1986). Другими словами, детектирование движения происходит не сразу: для слуховой системы, как и для других сенсорных систем, характерна инерционность — сохранение во времени определенного состояния (Альтман 2008). Вследствие инерционности при локализации движущихся источников звука воспринимаемые начальные и конечные точки траекторий смещаются относительно их объективного положения, что также свидетельствует о широком временном окне интеграции, необходимом для восприятия движения и определения его параметров. Впервые это было показано в условиях свободного звукового поля в исследовании с предъявлением тональных звуковых стимулов длительностью 50–300 мс, двигавшихся со скоростью 90–360 град/с (Perott, Musicant 1977). Позже аналогичные результаты

были получены для более медленных шумовых стимулов — длительностью от 2,375 до 4,75 с, двигавшихся со скоростями от восьми до 16 град/с (Getzmann 2005a; 2005b; Getzmann et al. 2004). Было показано, что смещение воспринимаемого положения наблюдается в момент включения и выключения стимула и отсутствует в середине звучания (Getzmann, Lewald 2007). Критически важным фактором, влияющим на величину смещения конечной точки, является постоянство скорости движения стимула (Getzmann, Lewald 2009). Авторы предполагают, что смещение конечной точки объясняется механизмами экстраполяции, которые действуют при восприятии стимулов, движущихся с постоянной скоростью. Слуховая система «достраивает» воспринимаемую траекторию, предсказывая положение движущегося источника звука в соответствии с выявленными закономерностями, чтобы компенсировать отставание в обработке поступающей динамической информации.

При дихотическом предъявлении стимулов величина смещения воспринимаемого положения движущихся ЗО оценивалась относительно эталонных неподвижных ЗО с теми же значениями  $\Delta T$  и  $\Delta I$  (Варягина 2001; 2005; Петропавловская и др. 2010; 2011; Altman et al. 1999). В работах, где центробежное движение ЗО создавали при помощи  $\Delta T$ , показано, что смещение воспринимаемого положения начальных точек зависит преимущественно от скорости движения (Петропавловская и др. 2010), а конечных точек — от скорости, длительности и положения. Начальные точки всегда смещались в направлении движения, конечные точки в центральном секторе субъективного акустического пространства (при  $\Delta T < 200$  мкс) также смещались в направлении движения, а в периферическом (при  $\Delta T > 400$  мкс) — навстречу движению. Смещение навстречу движению было сильнее выражено при малой длительности (100 и 200 мс) и расчетных скоростях выше 200–300 град/с (Петропавловская и др. 2011). Для более длинных и медленных звуковых стимулов (длительность две секунды, расчетная скорость 45 град/с), напротив, было показано достоверное смещение воспринимаемого положения конечных точек в направлении движения (Altman et al. 1999), а величина смещения начальных точек не достигала значимых различий с неподвижными ЗО (Варягина 2001; 2005).

Таким образом, вследствие инерционных процессов воспринимаемое положение начальных точек траекторий при больших скоростях может сильно смещаться относительно объективного в направлении движения. Конечные

точки могут демонстрировать как опережающее смещение, так и отставание, в зависимости от соотношения инерционных и предсказательных процессов в обработке стимула. Угловая протяженность субъективного акустического пространства, определяемая воспринимаемым положением источников звука, может существенно изменяться под влиянием процессов слуховой обработки движения.

С 2006 года в электроэнцефалографических исследованиях начали применять стимулы с отсроченным началом движения (Варфоломеев, Старостина 2006; Krumbholz et al. 2007). Звуковые стимулы, которые используют в этой экспериментальной парадигме, состоят из двух или трех последовательных фрагментов, следующих друг за другом без пауз. Стимул начинается со стационарного фрагмента длительностью 700–1000 мс, за ним следует участок движения длительностью от 150 до 1000 мс. За участком движения может следовать еще один неподвижный фрагмент. Такой временной паттерн позволяет зарегистрировать вызванный потенциал на начало движения как на отдельное слуховое событие.

Звуковые стимулы с отсроченным началом движения воспринимаются как один непрерывный ЗО, изменяющий свое положение в пространстве. На поведенческом уровне особенности восприятия таких стимулов исследовали преимущественно в задаче на различение направления отсроченного движения. В частности, было показано, что время реакции на отсроченное движение уменьшалось при увеличении скорости и при увеличении длительности начального стационарного участка (Getzmann 2008, 2009). При предъявлении стимулов в свободном звуковом поле или в виртуальном звуковом пространстве (при помощи передаточных функций головы) время реакции было меньше, чем в условиях дихотической стимуляции (Getzmann, Lewald 2010). Показано также, что функция зависимости минимально различимого угла движения от скорости имеет меньший наклон для отсроченного движения, чем в случае, когда начало движения совпадает с моментом включения (Семенова и др. 2020). Данные о локализации стимулов с отсроченным началом движения в литературе отсутствуют.

Можно предположить, что при локализации стимулов с отсроченным движением стационарные фрагменты в начале и в конце стимула будут сглаживать влияние инерционных и предсказательных процессов. В таком случае, при достаточной длительности стационарных фрагментов воспринимаемое положение начальной



и конечной точек траектории движения будет совпадать с положением предъявленных по отдельности неподвижных стимулов, имеющих такие же пространственные характеристики. Однако, если стимул состоит из нескольких последовательных фрагментов, на их локализацию могут воздействовать эффекты «притяжения» (pulling) и «отталкивания» (pushing) (см. обзор Lee et al. 2009). Известно, что пространственные признаки отдельных элементов, входящих в состав комплексных звуковых стимулов, вносят существенный вклад в определение перцептивных границ между слуховыми объектами. В свою очередь, восприятие пространственных характеристик отдельных элементов зависит от того, как слуховая система поделит слуховой поток на объекты. Воспринимаемое положение одновременно или последовательно предъявляемых звуковых стимулов отличается от того, где бы они слышались, если бы предъявлялись изолированно. «Притяжение» (уменьшение воспринимаемого углового расстояния) наблюдается между сигналами, которые по совокупности других характеристик (спектральных и временных) могут относиться к одному объекту, и свидетельствует об интеграции их пространственных признаков. «Отталкивание» (увеличение воспринимаемого углового расстояния) между звуковыми стимулами считается признаком того, что слуховая система относит их к разным объектам. Влияние «отталкивания» уменьшается по мере разнесения конкурирующих стимулов во времени.

Применительно к пространственному восприятию стимулов с отсроченным началом движения можно выдвинуть два предположения. С одной стороны, можно ожидать, что начальные и конечные точки траекторий будут «притягиваться» друг к другу, так как непрерывный тестовый стимул интерпретируется испытуемыми как один движущийся объект, а не как несколько отдельных, и это будет приводить к сокращению длины воспринимаемой траектории. Если это предположение верно, то субъективная протяженность слухового пространства будет «сжиматься» относительно протяженности пространства, задаваемого неподвижными сигналами с такими же значениями межшумных различий. С другой стороны, нельзя исключить, что определяющую роль будут играть предсказательные механизмы обработки движения, и тогда начальные и конечные точки участка движения будут «отталкиваться», так что участок движения будет «раздвигать» окружающие его неподвижные фрагменты. В таком случае протяженность субъективного слухового пространства будет увели-

чиваться. Целью данного исследования является проверка этих предположений путем оценки влияния движения звукового стимула на воспринимаемое положение окружающих его неподвижных фрагментов.

## Методика

### *Этические нормы*

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комиссией по этике ФГБУН Института физиологии им. И. П. Павлова РАН (протокол № 22-02). Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

### *Условия эксперимента и испытуемые*

В экспериментах приняли участие 18 праворуких испытуемых (шесть мужчин и 12 женщин) в возрасте от 18 до 45 лет (средний возраст  $24,8 \pm 4,7$  лет) с нормальным слухом (по данным тональной аудиометрии) и без истории неврологических заболеваний. Во время экспериментов испытуемые располагались в кресле внутри экранированной звукоизолированной камеры, и им дихотическим способом предъявляли звуковые сигналы. Время регистрации в каждый экспериментальный день составляло в среднем около двух часов. При необходимости по просьбе испытуемого делали перерывы на отдых. Каждый испытуемый совершал два-три визита в лабораторию.

На предварительном этапе у всех испытуемых измеряли монауральные пороги слышимости с использованием шумовых посылок полосой 200–10000 Гц и длительностью 700 мс. В дальнейшем интенсивность звуковых сигналов устанавливалась на уровне 45 дБ над порогом слышимости испытуемого на каждом ухе. При необходимости интенсивность сигнала, подаваемого на одно из ушей, изменяли таким образом, чтобы при дихотической подаче звуковой образ находился по средней линии головы испытуемого. Обычно вводимая коррекция не превышала 3 дБ.

### *Стимулы*

Подробное описание синтеза сигналов изложено в нашей предыдущей работе (Shestopalova et al. 2022). Исходными сигналами служил отрезок белого шума, синтезированный с частотой

дискретизации 96 кГц и фильтрованный в полосе 200–10000 Гц. Сигналы преобразовывали в аналоговую форму при помощи многоканальной аудиоплаты Gina24 (Echo Audio, США) и предъявляли дихотически с помощью звукоизлучателей Etymotic ER-2 (Etymotic Research Inc., США) с ушными вкладышами.

В эксперименте были использованы два типа сигналов: неподвижные и движущиеся, различавшиеся пространственными свойствами. Фронты длительностью 10 мс, сглаженные косинусоидальной функцией, были наложены в начале и в конце каждого стимула. С учетом фронтов длительность неподвижного стимула составляла 1020 мс. В пределах одной эпохи стимулы повторялись трижды и были разделены паузами по 750 мс. Таким образом, длительность одной эпохи для неподвижных стимулов составляла 4560 мс. Пространственное положение всех стимулов задавалось величиной межшумных различий по интенсивности ( $\Delta I$ ) между бинаурально предъявляемыми сигналами. Неподвижные стимулы характеризовались пятью значениями  $\Delta I$ :  $-10$  дБ,  $-5$  дБ,  $0$  дБ,  $5$  дБ и  $10$  дБ. Они вызывали у слушателей ощущение неподвижного ЗО, расположенного у левого уха ( $\Delta I = -10$  дБ), слева от средней линии головы ( $\Delta I = -5$  дБ), около средней линии головы ( $\Delta I = 0$  дБ), справа от средней линии ( $\Delta I = 5$  дБ) или у правого уха ( $\Delta I = 10$  дБ) (рис. 1).

Движущиеся сигналы состояли из трех фрагментов, следующих друг за другом без паузы: 1) начального участка длительностью 1010 мс с постоянной величиной  $\Delta I$ , равной  $0$  или  $\pm 10$  дБ; 2) участка движения длительностью 200 мс (быстрое движение) или 400 мс (медленное движение) с линейным изменением  $\Delta I$  (от  $0$  до  $\pm 10$  дБ и от  $\pm 10$  до  $0$  дБ); 3) конечного участка длительностью 810 мс или 610 мс соответственно, с постоянной конечной величиной  $\Delta I$ , равной  $\pm 10$  дБ или  $0$  дБ. Таким образом, полная длительность движущегося сигнала с учетом фронтов составляла 2020 мс. Данные стимулы вызывали сначала ощущение неподвижного ЗО по средней линии головы, а затем его плавного движения либо влево или вправо, либо ощущение неподвижного ЗО около одного из ушей, а затем его плавного движения к средней линии головы. В пределах одной эпохи движущиеся стимулы повторялись трижды и были разделены паузами по 750 мс. Полная длительность эпохи с движущимися стимулами составляла 7560 мс.

### *Процедура эксперимента*

Каждая экспериментальная серия состояла либо из неподвижных, либо из движущихся

сигналов. В пределах серии с неподвижными стимулами 5 возможных положений стимулов повторяли по 15 раз. В сериях с движущимися сигналами 4 траектории (от центра к левому уху или обратно, от центра к правому уху или обратно) предъявляли по 16 раз. Стимулы во всех сериях чередовали в квазислучайном порядке (рис. 1). Каждому испытуемому было предъявлено по две серии с неподвижными стимулами и четыре серии с движущимися стимулами (две с быстрым движением и две с медленным). Порядок следования серий был рандомизирован.

Слушатели должны были определять пространственное положение ЗО и в конце каждой эпохи показывать его касанием пера на рабочей поверхности графического планшета Genius G-pen 450. Для этого на рабочей поверхности была изображена дуга, на которую испытуемые должны были спроецировать воспринимаемое положение ЗО. В сериях с неподвижными стимулами испытуемый должен был дослушать до конца эпоху с трехкратным повторением сигнала, а потом одним касанием пера отметить положение ЗО на графическом планшете. В сериях, где предъявляли движущиеся сигналы, испытуемый должен был коснуться пером дуги дважды — в начале и в конце воспринимаемой им траектории движения. Если он воспринимал сигнал как неподвижный, то должен был коснуться дуги дважды в том месте, где сигнал был расположен. Интервал от ответа испытуемого до начала следующего стимула подбирался индивидуально и составлял 1–1,5 с.

Испытуемый получал инструкцию смотреть на планшет, расположенный на подставке у него на коленях, и по возможности не менять положение тела во время опыта. Положение головы и туловища слушателя в камере жестко не фиксировали, но испытуемый сидел в кресле с подголовником и подлокотниками, что обеспечивало стабильность положения тела.

### **Анализ данных**

Воспринимаемое положение начальных и конечных точек траектории движения, а также положение неподвижных стимулов, регистрировали в градусах относительно средней линии головы. Отрицательные величины соответствовали расположению ЗО слева от средней линии головы, а положительные — справа. В индивидуальных данных усреднение проводили по 15 ответам на один тип стимула для неподвижных сигналов и по 16 ответам для движущихся.

Статистическую оценку полученных результатов проводили по отдельности для воспри-

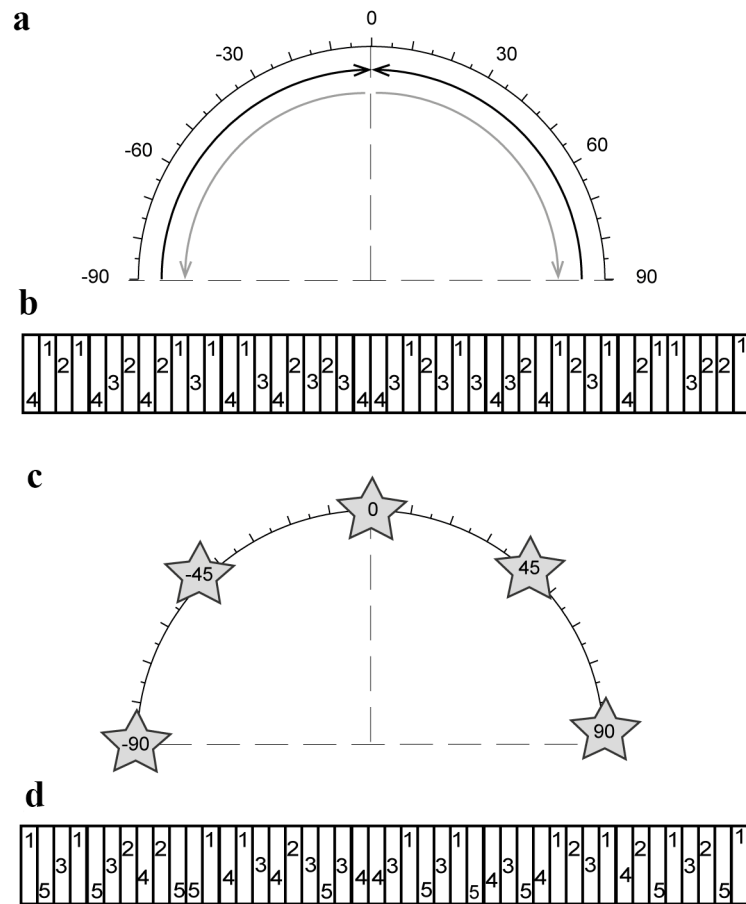


Рис. 1. Структура стимуляции в течение серии. а — расчетные траектории движения звуковых стимулов. б — пример квазислучайного порядка предъявления стимулов в течение серии, где 1 — движение от левого уха к средней линии головы, 2 — от средней линии головы к уху, 3 — от правого уха к средней линии, 4 — от средней линии к правому уху. с — расчетное местоположение неподвижных стимулов. д — их квазислучайное предъявление в течении серии, где 1 — у левого уха, 2 — слева от средней линии головы, 3 — по средней линии головы, 4 — справа от средней линии, 5 — у правого уха

Fig. 1. Stimulation structure within a series. Fig. 1a shows four calculated trajectories of auditory motion. Fig. 1b is an example of a quasi-random order of stimulus presentation within a series. The stimuli moved from the left ear to the head midline (1), from the midline of the head to the ear (2), from the right ear to the midline (3), from the midline to the right ear (4). Fig. 1c shows calculated locations of stationary stimuli. Fig. 1d shows quasi-random presentation of stimuli within a series. The stimuli were located at the left ear (1), to the left of the head midline (2), at the head midline (3), to the right of the midline (4), at the right ear (5)

нимаемого положения центральных и латеральных точек и отдельно для каждой скорости (быстро, медленно). Для центральных точек был проведен однофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями (rmANOVA) с фактором «Точка» (неподвижная, начальная, конечная). Для латеральных точек использовали двухфакторный анализ с факторами «Точка»

(неподвижная, начальная, конечная) и «Сторона звучания» (слева, справа) также отдельно для каждой скорости. При этом значения, соответствующие левой стороне звучания, умножали на  $-1$ , чтобы они располагались в том же диапазоне числовой оси, как и значения, соответствующие правой стороне. После такого преобразования отрицательные величины будут

соответствовать воспринимаемому положению звукового образа в контралатеральной половине субъективного акустического пространства по отношению к расчетному положению звукового стимула. Под фактором «Сторона звучания» имеется в виду сторона акустического пространства, в которой располагалась расчетная траектория сигнала. По фактору «Точка» исследовали влияние направления движения стимула на его воспринимаемое положение для начальных и конечных точек траекторий. Важно подчеркнуть, что и для центральных, и для латеральных точек фактор «Точка» содержал все три уровня (неподвижная, начальная, конечная), так как движение могло быть направлено как от центра к уху, так и от уха к центру. При попарных сравнениях применяли поправку Бонферрони. Все сравнения проводили с уровнем значимости  $p < 0,05$ .

### Результаты

Зависимость воспринимаемого положения неподвижных ЗО от величины междушумных различий  $\Delta I$  была практически линейной (рис. 2). При равной интенсивности стимуляции на правом и левом ушах воспринимаемое положение ЗО было  $-1 \pm 1$  град (среднее  $\pm$  ст. ош.). Максимальная степень латерализации, достигаемая при  $\Delta I = \pm 10$  дБ, составила в среднем  $61 \pm 3$  град (по модулю).

Основным показателем угловой протяженности субъективного акустического пространства была длина воспринимаемых траекторий, т. е. угловое смещение в градусах, пройденное ЗО. Длины воспринимаемых траекторий движущихся стимулов в левой акустической полусфере составили  $70 \pm 2$  град при движении от центра и  $69 \pm 2$  град при движении к центру, а в правой полусфере  $68 \pm 2$  град при движении в обоих направлениях (рис. 3). Угловое расстояние между неподвижными точками, соответствующими концам траекторий движения, было значительно меньше. Это указывает на главный феномен, которому посвящена данная работа: наличие движения расширяет латеральные границы акустического пространства.

В области средней линии головы воспринимаемое положение начальных и конечных точек траекторий было смещено против направления движения. Независимо от скорости, при движении ЗО от центра воспринимаемое положение начальной точки траектории было смещено на два градуса на противоположную половину субъективного акустического пространства. При движении от уха к центру конечная точка, наоборот, на два–четыре градуса не доходила до средней линии головы. Однако вследствие высокой индивидуальной вариабельности эта тенденция не достигла уровня значимости (рис. 2 и 3). В однофакторном дисперсионном анализе («Точка»: неподвижная,

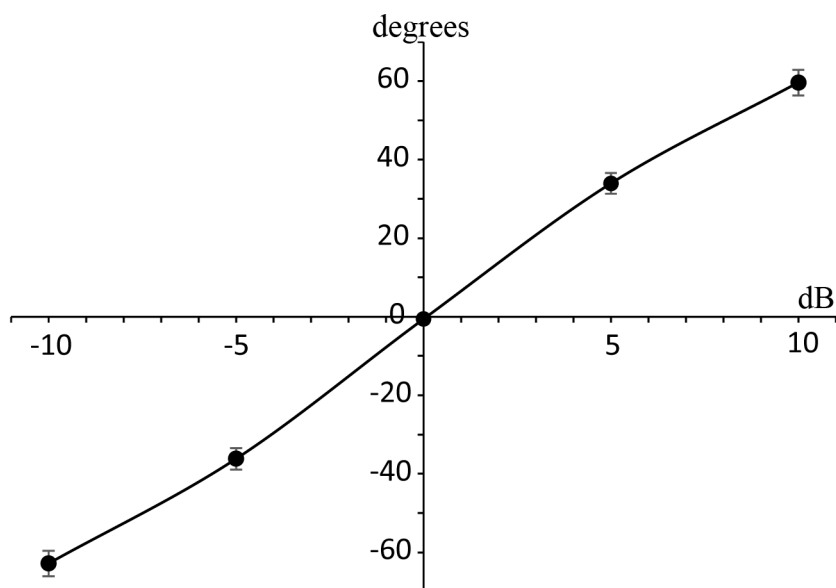


Рис. 2. Зависимость латерализации неподвижных ЗО от междушумных различий по интенсивности  $\Delta I$ . Усреднение здесь и далее — по всей выборке ( $n = 18$ ). По оси Y — воспринимаемое положение (в градусах)

Fig. 2. Lateralization of stationary sound images as a function of interaural level differences (ILD). Here and in what follows the data are averaged across the entire group ( $n = 18$ ). Y-axis is the perceived sound position (in degrees)



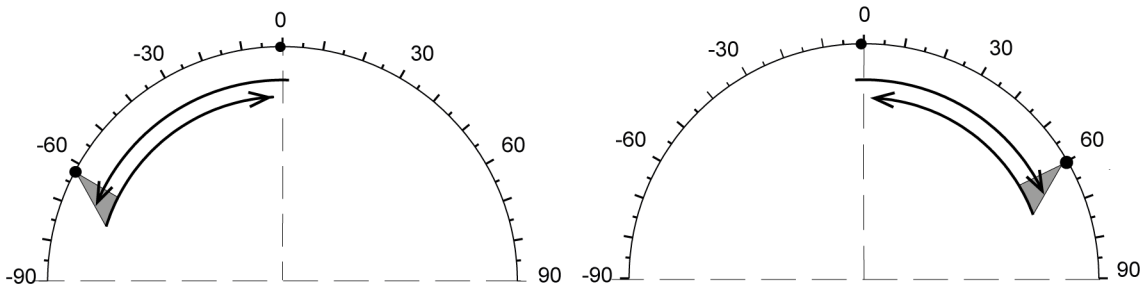


Рис. 3. Воспринимаемые траектории движущихся ЗО. Кружками обозначено положение неподвижных ЗО, стрелками — направление движения. Треугольники показывают расширение слухового пространства относительно положения неподвижных ЗО

Fig. 3. Perceived sound movement trajectories. Arrows indicate the direction of movement. Circles indicate the location of stationary sounds. Triangles indicate the expansion of auditory space relative to stationary sound locations

начальная, конечная) для положения центральных точек значимых различий не обнаружено ( $p > 0,05$ ) ни для быстрого, ни для медленного движения.

Воспринимаемое положение латеральных точек было проанализировано при помощи *rmANOVA* с двумя факторами: «Точка» (неподвижная, начальная, конечная) и «Сторона» (слева, справа). Для медленного движения выявлены значимые главные эффекты факторов «Точка» ( $F(1,588, 27,00) = 6,10, p < 0,01$ ) и «Сторона» ( $F(1,17) = 5,13, p < 0,05$ ). Взаимодействие факторов «Точка»\*«Сторона» не было значимым ( $p > 0,5$ ). Согласно попарным сравнениям по фактору «Сторона», ответы с правой стороны располагались ближе к центру на  $4 \pm 2$  град, чем с левой ( $p < 0,05$ ). Попарные сравнения по фактору «Точка» показали, что неподвижные латеральные точки расположены ближе к средней линии головы на  $10 \pm 2$  град по сравнению с начальными точками траекторий (рис. 4). Интересно, что положение начальных латеральных точек отличалось от положения неподвижных ( $p < 0,05$ ), но не отличалось от положения конечных ( $p > 0,5$ ). Попарные сравнения по двухфакторному взаимодействию показали, что это утверждение справедливо как для левой ( $p < 0,01$ ), так и для правой полусферы ( $p < 0,05$ ), и в обеих частях пространства начальные точки траекторий были латерализованы на 10–11 градусов дальше от центра, чем соответствующие им неподвижные точки.

Аналогичный анализ для быстрого движения выявил значимость только одного фактора — «Точки» ( $F(1,665, 28,30) = 5,72, p < 0,05$ ). Эффект «Стороны» оказался незначимым ( $p > 0,05$ ).

Взаимодействие факторов «Точка»\*«Сторона» также не было значимым ( $p > 0,5$ ). Попарные сравнения показали, что положение начальной точки отличается от положения неподвижной как слева ( $p < 0,05$ ), так и справа ( $p < 0,01$ ): начальные точки движения латерализованы дальше от центра, чем неподвижные. Эти же попарные сравнения позволили увидеть такой же паттерн смещения латеральных точек относительно неподвижных, как и в случае медленного движения: на 10–12 градусов в сторону уха.

Для статистического подтверждения наличия или отсутствия эффекта скорости был проведен дополнительный анализ *rmANOVA*, отдельно для центральных и латеральных точек. Выборку для этого анализа формировали, вычисляя разности воспринимаемого положения конечных/начальных точек траекторий от соответствующих им неподвижных точек. Факторами служили «Скорость» (быстро, медленно), «Сторона» (слева, справа) и «Точка» (начальная, конечная). Фактор скорости оказался не значимым ни для центральных, ни для латеральных точек ( $p > 0,5$ ).

## Обсуждение

Психофизический эксперимент был направлен на исследование угловых пределов субъективного акустического пространства при прослушивании неподвижных и движущихся звуковых стимулов.

### *Латерализация неподвижных стимулов*

В настоящем исследовании получена практически линейная связь между междушными



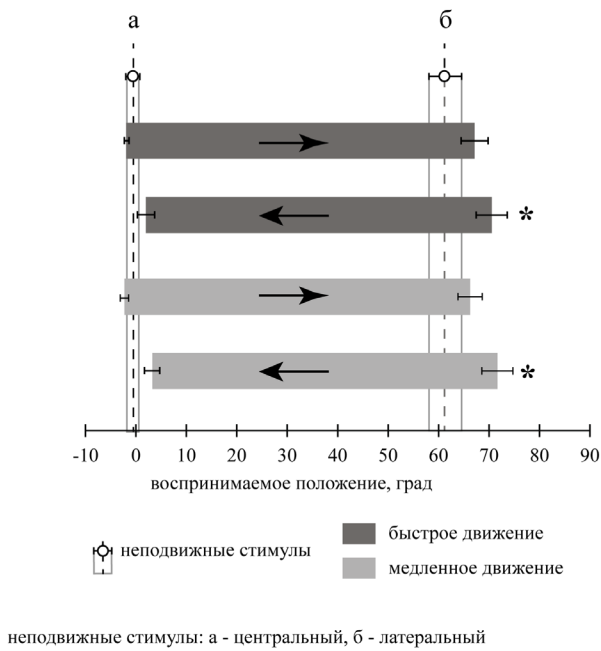


Рис. 4. Воспринимаемое положение звуковых образов. Неподвижные стимулы: а — центральный, б — латеральный. Значения, соответствующие левой стороне звучания, умножены на  $-1$  и усреднены со значениями, соответствующими правой стороне. Длина полос соответствует длине траекторий движения, а стрелки показывают направление движения (от центра или к центру). Вертикальный пунктир показывает положение неподвижного ЗО в центре (а) и при максимальной латерализации (б). Звездочками обозначены достоверные различия между положением начальных точек траекторий и неподвижных стимулов ( $p < 0,05$ )

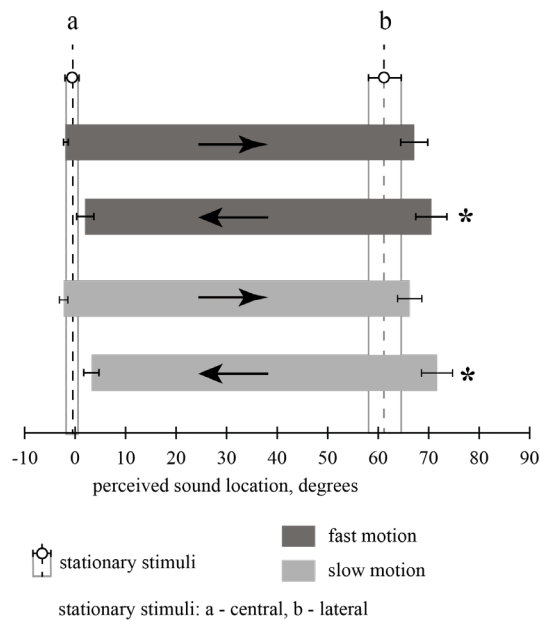


Fig. 4. Perceived sound locations. Stationary stimuli: central (a) and lateral (b). The angular values corresponding to the left auditory hemifield were multiplied by  $-1$  and averaged with those corresponding to the right auditory hemifield. The strip length shows the length of the trajectory. Arrows indicate the direction of movement (from/to center). Vertical dashed lines indicate the perceived locations of stationary sounds in the center (a) or at the lateral position (b). Asterisks indicate the significant differences in perceived locations between stationary sounds and initial points of movement ( $p < 0,05$ )

различиями по интенсивности  $\Delta I$  в диапазоне от  $-10$  дБ до  $+10$  дБ и воспринимаемым положением ЗО (рис. 2). Как известно из литературы, при нарастании межшумных различий  $\Delta I$  степень латерализации увеличивается линейно до некоторых пределов, а далее входит в насыщение, так что в общем случае кривые, подобные приведенной на рисунке 2, имеют S-образную форму (Блауэрт 1979; Yost, Hafter 1987). Диапазон линейного участка этих зависимостей сильно различается в разных экспериментальных условиях. Так, Йост и Хафтер (Yost, Hafter 1987) и Дингл (Dingle et al. 2012) приводят данные об отклонении латерализации от линейности, начиная от  $\Delta I = \pm 6$  дБ; по данным Блауэрта (Блауэрт 1979) линейный участок продолжался до  $\Delta I = \pm 12$  дБ, а по данным Озмерала (Ozmeral et al. 2019) — до  $\pm 20$  дБ. В случае межшумных различий по времени максимальная латерализация достигается при  $\Delta T = 630$  мкс, а кривые латерализации отклоняются от линейности уже при  $\Delta T > 300$  мкс и характеризуются более выраженной S-образностью, чем при межшумных различиях по интенсивности (Dingle et al. 2012). Можно заключить, что расширение субъективного акустического пространства, которое будет обсуждаться ниже, не может быть следствием нелинейности, характерной для латеральных областей, поскольку использованный нами диапазон  $\Delta I$  приходился на линейный участок.

Максимально латерализованное положение неподвижного ЗО, полученное в настоящем исследовании при  $\Delta I = \pm 10$  дБ, составило в среднем  $61 \pm 3$  град, что соответствует положению полной латерализации при применении межшумных различий по времени при  $\Delta T > 600$  мкс (Петропавловская и др. 2011). Таким образом, при предъявлении неподвижных стимулов протяженность субъективного слухового пространства (от крайнего левого до крайнего правого воспринимаемого положения ЗО) составила порядка 120 град. Это находится в соответствии с результатами Варягиной (2005), где сигналами были неподвижные серии щелчков, протяженность слухового пространства у разных испытуемых варьировала от 50 до 149 градусов, при  $\Delta I = \pm 13$  дБ.

#### *Воспринимаемое положение центральных точек*

При движении от центра к уху и от уха к центру, локализованные вблизи центра конечные и начальные точки траекторий не отличались по положению от неподвижных точек, однако можно отметить интересную тенденцию в сравнении со стимулами, движущимися на всем

протяжении звучания. Для коротких быстрых сигналов (без стационарного фрагмента в начале) при движении от центра к ушам описано значительное смещение воспринимаемого начала траектории в направлении движения, достигавшее у некоторых испытуемых 30 град (Петропавловская и др. 2010). Аналогичное смещение обнаружено ранее при стимуляции в свободном звуковом поле (Getzmann, Lewald 2007; Perrott, Musicant 1977). Однако при увеличении длительности стимула и уменьшении скорости его движения этот эффект сходит на нет (Варягина 2001; 2005). В нашем исследовании при определении положения неподвижного фрагмента, за которым следовал короткий участок быстрого движения, смещение в направлении движения не было обнаружено. Наоборот, при отсроченном движении от центра к уху начальные точки траекторий воспринимались с небольшим смещением в противоположную половину слухового поля, хотя его величина и не превышала трех градусов. При движении ЗО от ушей к центру воспринимаемое положение конечных точек в условиях совпадения окончания движения и звучания смещалось на три – семь градусов в направлении движения (Altman et al. 1999), а в нашем исследовании — для стимулов, дополненных стационарным участком — на два – четыре градуса против направления движения. Обнаруженные нами отличия от неподвижных стимулов были статистически незначимыми.

#### *Восприятие латеральных точек*

При движении от центра к периферии конечные точки траекторий располагались немного дальше от центра, чем соответствующие неподвижные точки (на шесть градусов), но статистической значимости эти отличия не достигали. При движении в обратном направлении (от левого или правого уха к центру), начальные точки траекторий были расположены значительно ближе к уху, чем соответствующие неподвижные точки: справа — на  $10 \pm 3$  град для обеих скоростей, слева на  $11 \pm 3$  град для быстрого движения и на  $13 \pm 3$  град для медленного. Таким образом, при восприятии стимулов, содержащих участок движения, протяженность субъективного слухового пространства увеличивалась на 21–23 град.

На периферии субъективного слухового пространства, как и в центральном секторе, характер смещения отличался от описанного для стимулов, движущихся на всем протяжении звучания. В работе Петропавловской с соавторами (2011) при движении ЗО от центра к ушам

за счет  $\Delta T$  для стимулов длительностью 200 мс (что соответствует длительности участка быстрого движения в настоящем исследовании) конечные точки располагались в среднем на пять градусов ближе к центру, чем соответствующие неподвижные ЗО. Иными словами, наблюдалась недооценка длины траектории, или сокращение протяженности субъективного акустического пространства. Совпадающее с нашими результатами смещение конечных точек в направлении движения было получено в свободном звуковом поле для стимулов длительностью две–пять секунд со скоростями 8–45 град/с (Getzmann 2005a; Getzmann, Lewald 2007; Getzmann et al. 2004). Однако при переменной скорости движения (а к этой категории можно отнести и наши стимулы с неподвижными фрагментами) величина смещения уменьшалась (Getzmann, Lewald 2009).

Наиболее выражены были различия в восприятии положения начальных точек траекторий при движении стимула от периферии к центру. Для непрерывно движущихся стимулов характерно смещение в направлении движения (Getzmann 2005b; Getzmann, Lewald 2007). В нашей работе получено смещение противоположной направленности. Отчасти это явление может объясняться не процессами интеграции пространственной информации в слуховой системе, а влиянием более поздних процессов — принятия решения и удержания в памяти информации о нем. В соответствии с полученной инструкцией, в наших опытах испытуемый сначала прослушивал весь стимул целиком, а затем показывал начало и конец траектории. Для этого необходимо некоторое время удерживать в памяти воспринятое положение. При этом начало траектории оказывается сильнее отставлено во времени от момента ответа, чем ее конец. Для неподвижных источников звука ранее была показана систематическая переоценка эксцентриситета запомненных целей по сравнению с локализацией стимула непосредственно во время звучания, причем эта переоценка увеличивалась со временем удержания стимула в памяти (Lewald, Ehrenstein 2001).

### *Общее обсуждение*

Наличие неподвижных фрагментов в начале и конце стимула, как и ожидалось, значительно сгладило влияние инерционности, полностью устранив смещение воспринимаемого положения начальных точек в направлении движения. Сокращения воспринимаемой длины траектории, которая могла бы быть следствием притяжения между разными частями стимула, объединен-

ными в единый движущийся объект, получено не было. Напротив, для начальных точек было характерно смещение против направления движения, которое можно рассматривать как проявление отталкивания. Оно было сильнее выражено в периферической области слухового пространства, чем в центральной.

Необходимо отметить, что в нашем исследовании движение стимулов создавалось за счет  $\Delta I$ , а в работах, с которыми мы сравниваем полученные результаты, применяли звуковые стимулы, созданные за счет изменения  $\Delta T$  либо в свободном звуковом поле, т. е. при сочетанном изменении  $\Delta T$  и  $\Delta I$ . Для того, чтобы распространить полученные результаты на разные бинауральные признаки, необходимо провести аналогичное исследование для стимулов, в которых пространственные признаки задаются через межшумные различия по времени. Однако скорее всего обнаруженные закономерности связаны с более высокими уровнями обработки информации, чем первичный анализ бинауральных признаков.

Согласно полученным данным, при восприятии стимулов с отсроченным началом движения латеральные границы слухового пространства раздвигались в направлении периферии, по сравнению с воспринимаемым положением неподвижных стимулов. Направление и скорость движения стимула не влияли на величину этого сдвига — латеральные точки в любом случае смещались от центра (начальные — против направления движения, конечные — по направлению движения). Однако величина смещения была значимой только для начальных точек.

Можно предположить, что восприятие положения начальной точки оказывается искажено сильнее, чем конечной, по причине разной экологической значимости. Итог движения важнее, чем его источник, поэтому фокус внимания может произвольно смещаться на окончание движения, по сравнению с его началом. Это компенсирует «расширение пространства», вызванное движением ЗО в его средней части. Другое возможное объяснение состоит в проявлении категориального восприятия. Так, в исследованиях Голоба с соавторами (Golob et al. 2016; 2017) показано, что категоризация может влиять на самые базовые уровни восприятия. Возможно, движущийся участок в середине стимула влиял на суждение о положении соседних неподвижных фрагментов за счет объединения их в единую категорию движущихся объектов. Классифицировав стимул как движущийся, слуховая система на следующих стадиях обработки компенсирует характерное для них искажение восприятия, достраивая «пропущенное» начало траектории.

Полученные результаты находятся в соответствии с представлением о том, что слуховая кора является не конечным звеном слухового анализатора, а компонентом сложных распределенных сетей, в которых репрезентации стимулов интегрированы с процессами внимания и принятия решений (Irvine 2018). Сенсорные сети коры непрерывно получают обратную связь и нейромодулирующие воздействия, обеспечивающие оптимизацию поведенческих реакций (Roelfsema, Holtmaat 2018).

### Выводы

В области средней линии головы воспринимаемое положение начальных и конечных точек траекторий было незначительно смещено против направления движения. Независимо от скорости, при движении ЗО от центра воспринимаемое положение начальной точки было смещено на два градуса на противоположную сторону субъективного акустического пространства. При движении от уха к центру, наоборот, конечная точка не доходила на два – четыре градуса до средней линии головы.

Самое сильное смещение воспринимаемого положения против направления движения (на 10–13 градусов) наблюдалось для начальных латеральных точек, при движении от ушей к центру. Латеральные конечные точки при движении от центра к ушам были незначительно (и недостоверно) смещены в направлении движения.

Тенденция к расширению субъективного акустического пространства сильнее выражена в периферической области, чем в центральной, и для начальных точек траектории сильнее, чем для конечных.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

### Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

### Соответствие принципам этики

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комиссией по этике ФГБУН Института физиологии им. И. П. Павлова РАН (протокол № 22-02).

### Ethics Approval

All studies were conducted in accordance with the principles of biomedical ethics formulated in the Helsinki Declaration of 1964 and its subsequent updates, and approved by the Ethics Commission of the Pavlov Institute of Physiology RAS (Protocol No. 22-02).

### Вклад авторов

- a) Саликова Диана Алиевна — дизайн исследования, набор испытуемых, проведение экспериментов, подготовка иллюстраций, работа над текстом;
- б) Петропавловская Екатерина Алексеевна — дизайн исследования, создание программного обеспечения для проведения эксперимента, статистический анализ результатов, подготовка иллюстраций, работа над текстом;
- в) Шестопалова Лидия Борисовна — дизайн исследования, работа над текстом.

### Author Contributions

- a) Diana A. Salikova developed the study design, recruited the subjects, conducted experiments, prepared the figures, drafted the manuscript;
- b) Ekaterina A. Petropavlovskaja developed the study design and software for the experimental research, performed the statistical analysis of results, prepared the figures, drafted the manuscript;
- c) Lidiya B. Shestopalova developed the study design, drafted the manuscript.

### Список литературы

- Альтман, Я. А. (2008) Инерционные процессы в слуховой системе при локализации движущихся источников звука. *Журнал высшей нервной деятельности*, т. 58, № 3, с. 309–318.
- Альтман, Я. А. (2011) *Пространственный слух*. СПб.: Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 311 с.
- Блауэрт, Й. (1979) *Пространственный слух*. Москва: Энергия, 224 с.
- Варфоломеев, А. Л., Старостина, Л. В. (2006) Слуховые вызванные потенциалы человека при иллюзорном движении звукового образа. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*, т. 92, № 9, с. 1046–1057.



- Варягина, О. В. (2001) Оценка человеком начальной точки траектории движения звукового образа. *Сенсорные системы*, т. 15, № 4, с. 324–333.
- Варягина, О. В. (2005) Оценка испытуемыми длины траектории движения слитного звукового образа. *Физиология человека*, т. 31, № 3, с. 32–38.
- Петропавловская, Е. А., Шестопалова, Л. Б., Вайтулевич, С. Ф. (2010) Проявления инерционности слуховой системы при локализации движущихся звуковых образов малой длительности. *Физиология человека*, т. 36, № 4, с. 34–43.
- Петропавловская, Е. А., Шестопалова, Л. Б., Вайтулевич, С. Ф. (2011) Предсказательная способность слуховой системы при плавном движении и скачкообразном перемещении звуковых образов малой длительности. *Журнал высшей нервной деятельности*, т. 61, № 3, с. 293–305.
- Семенова, В. В., Петропавловская, Е. А., Шестопалова, Л. Б., Никитин, Н. И. (2020) Константы восприятия отсроченного движения звуковых стимулов. *Успехи физиологических наук*, т. 51, № 2, с. 55–67. <https://doi.org/10.31857/S0301179820020095>
- Altman, J. A., Variaguina, O. V., Nikitin, N. I., Radionova, E. A. (1999) Lateralization of a moving auditory image: Interrelation of interaural time and intensity differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 1, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1121/1.424603>
- Dingle, R. N., Hall, S. E., Phillips, D. P. (2012) The three-channel model of sound localization mechanisms: Interaural level differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 5, pp. 4023–4029. <https://doi.org/10.1121/1.3701877>
- Getzmann, S. (2005a) Representational momentum in spatial hearing does not depend on eye movements. *Experimental Brain Research*, vol. 165, no. 2, pp. 229–238. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2291-0>
- Getzmann, S. (2005b) Shifting the onset of a moving sound source: A Fröhlich effect in spatial hearing. *Hearing Research*, vol. 210, no. 1-2, pp. 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2005.08.003>
- Getzmann, S. (2008) Effects of velocity and motion-onset delay on detection and discrimination of sound motion. *Hearing Research*, vol. 246, no. 1-2, pp. 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2008.09.007>
- Getzmann, S. (2009) Effect of auditory motion velocity on reaction time and cortical processes. *Neuropsychologia*, vol. 47, no. 12, pp. 2625–2633. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.012>
- Getzmann, S., Lewald, J. (2007) Localization of moving sound. *Perception & Psychophysics*, vol. 69, no. 6, pp. 1022–1034. <https://doi.org/10.3758/bf03193940>
- Getzmann, S., Lewald, J. (2009) Constancy of target velocity as a critical factor in the emergence of auditory and visual representational momentum. *Experimental Brain Research*, vol. 193, no. 3, pp. 437–443. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1641-0>
- Getzmann, S., Lewald, J. (2010) Effects of natural versus artificial spatial cues on electrophysiological correlates of auditory motion. *Hearing Research*, vol. 259, no. 1-2, pp. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.09.021>
- Getzmann, S., Lewald, J., Guski, R. (2004) Representational momentum in spatial hearing. *Perception*, vol. 33, no. 5, pp. 591–599. <https://doi.org/10.1068/p5093>
- Golob, E. J., Lewald, J., Getzmann, S., Mock, J. R. (2017) Numerical value biases sound localization. *Science Reports*, vol. 7, no. 1, article 17252. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17429-4>
- Golob, E. J., Lewald, J., Jungilligen, J., Getzmann, S. (2016) Interaction of number magnitude and auditory localization. *Perception*, vol. 45, no. 1-2, pp. 165–179. <https://doi.org/10.1177/0301006615599906>
- Grantham, D. W. (1986) Detection and discrimination of simulated motion of auditory targets in the horizontal plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, no. 6, pp. 1939–1949. <https://doi.org/10.1121/1.393201>
- Irvine, D. R. F. (2018) Auditory perceptual learning and changes in the conceptualization of auditory cortex. *Hearing Research*, vol. 366, pp. 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.03.011>
- Krumbholz, K., Hewson-Stoate, N., Schönwiesner, M. (2007) Cortical response to auditory motion suggests an asymmetry in the reliance on inter-hemispheric connections between the left and right auditory cortices. *Journal of Neurophysiology*, vol. 97, no. 2, pp. 1649–1655. <https://doi.org/10.1152/jn.00560.2006>
- Lee, A. K. C., Deane-Pratt, A., Shinn-Cunningham, B. G. (2009) Localization interference between components in an auditory scene. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, no. 5, pp. 2543–2555. <https://doi.org/10.1121/1.3238240>
- Lewald, J., Ehrenstein, W. H. (2001) Spatial coordinates of human auditory working memory. *Cognitive Brain Research*, vol. 12, no. 1, pp. 153–159. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(01\)00042-8](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(01)00042-8)
- Ozmeral, E. J., Eddins, D. A., Eddins, A. C. (2019) Electrophysiological responses to lateral shifts are not consistent with opponent-channel processing of interaural level differences. *Journal of Neurophysiology*, vol. 122, no. 2, pp. 737–748. <https://doi.org/10.1152/jn.00090.2019>
- Perrott, D. R., Musicant, A. D. (1977) Minimum audible movement angle: Binaural localization of moving sound sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, no. 6, pp. 1463–1466. <https://doi.org/10.1121/1.381675>
- Roelfsema, P. R., Holtmaat, A. (2018) Control of synaptic plasticity in deep cortical networks. *Nature Reviews Neurosciences*, vol. 19, no. 3, pp. 166–180. <https://doi.org/10.1038/nrn.2018.6>
- Shestopalova, I. B., Petropavlovskaja, E. A., Salikova, D. A. et al. (2022) Event-related potentials in conditions of auditory spatial masking in humans. *Human Physiology*, vol. 48, no. 6, pp. 633–643. <https://doi.org/10.1134/S0362119722700098>

Yost, W. A., Hafter, E. R. (1987) Lateralization. In: W. A. Yost, G. Gourevitch (eds.). *Directional hearing*. New York: Springer Publ., pp. 49–84. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4738-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4738-8_3)

## References

- Altman, Ya. A. (2008) Inertsionnye protsessy v slukhvoy sisteme pri lokalizatsii dvizhischikhsva istochnikov zvuka [Inertial processes in the auditory system during localization of moving sound sources]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti*, vol. 58, no. 3, pp. 309–318. (In Russian)
- Altman, J. A. (2011) *Prostranstvennyy slukh [Spatial hearing]*. Saint Petersburg: Pavlov Institute of Physiology RAS Publ., 311 p. (In Russian)
- Altman, J. A., Variaguina, O. V., Nikitin, N. I., Radionova, E. A. (1999) Lateralization of a moving auditory image: Interrelation of interaural time and intensity differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 1, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1121/1.424603> (In English)
- Blauert, J. (1979) *Prostranstvennyy slukh [Spatial hearing]*. Moscow: Energiya Publ., 224 p. (In Russian)
- Dingle, R. N., Hall, S. E., Phillips, D. P. (2012) The three-channel model of sound localization mechanisms: Interaural level differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 5, pp. 4023–4029. <https://doi.org/10.1121/1.3701877> (In English)
- Getzmann, S. (2005a) Representational momentum in spatial hearing does not depend on eye movements. *Experimental Brain Research*, vol. 165, no. 2, pp. 229–238. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2291-0> (In English)
- Getzmann, S. (2005b) Shifting the onset of a moving sound source: A Fröhlich effect in spatial hearing. *Hearing Research*, vol. 210, no. 1-2, pp. 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2005.08.003> (In English)
- Getzmann, S. (2008) Effects of velocity and motion-onset delay on detection and discrimination of sound motion. *Hearing Research*, vol. 246, no. 1-2, pp. 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2008.09.007> (In English)
- Getzmann, S. (2009) Effect of auditory motion velocity on reaction time and cortical processes. *Neuropsychologia*, vol. 47, no. 12, pp. 2625–2633. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.012> (In English)
- Getzmann, S., Lewald, J. (2007) Localization of moving sound. *Perception & Psychophysics*, vol. 69, no. 6, pp. 1022–1034. <https://doi.org/10.3758/bf03193940> (In English)
- Getzmann, S., Lewald, J. (2009) Constancy of target velocity as a critical factor in the emergence of auditory and visual representational momentum. *Experimental Brain Research*, vol. 193, no. 3, pp. 437–443. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1641-0> (In English)
- Getzmann, S., Lewald, J. (2010) Effects of natural versus artificial spatial cues on electrophysiological correlates of auditory motion. *Hearing Research*, vol. 259, no. 1-2, pp. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.09.021> (In English)
- Getzmann, S., Lewald, J., Guski, R. (2004) Representational momentum in spatial hearing. *Perception*, vol. 33, no. 5, pp. 591–599. <https://doi.org/10.1068/p5093> (In English)
- Golob, E. J., Lewald, J., Getzmann, S., Mock, J. R. (2017) Numerical value biases sound localization. *Science Reports*, vol. 7, no. 1, article 17252. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17429-4> (In English)
- Golob, E. J., Lewald, J., Jungilligens, J., Getzmann, S. (2016) Interaction of number magnitude and auditory localization. *Perception*, vol. 45, no. 1-2, pp. 165–179. <https://doi.org/10.1177/0301006615599906> (In English)
- Grantham, D. W. (1986) Detection and discrimination of simulated motion of auditory targets in the horizontal plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, no. 6, pp. 1939–1949. <https://doi.org/10.1121/1.393201>
- Irvine, D. R. F. (2018) Auditory perceptual learning and changes in the conceptualization of auditory cortex. *Hearing Research*, vol. 366, pp. 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.03.011> (In English)
- Krumbholz, K., Hewson-Stoate, N., Schönwiesner, M. (2007) Cortical response to auditory motion suggests an asymmetry in the reliance on inter-hemispheric connections between the left and right auditory cortices. *Journal of Neurophysiology*, vol. 97, no. 2, pp. 1649–1655. <https://doi.org/10.1152/jn.00560.2006> (In English)
- Lee, A. K. C., Deane-Pratt, A., Shinn-Cunningham, B. G. (2009) Localization interference between components in an auditory scene. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, no. 5, pp. 2543–2555. <https://doi.org/10.1121/1.3238240> (In English)
- Lewald, J., Ehrenstein, W. H. (2001) Spatial coordinates of human auditory working memory. *Cognitive Brain Research*, vol. 12, no. 1, pp. 153–159. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(01\)00042-8](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(01)00042-8) (In English)
- Ozmeral, E. J., Eddins, D. A., Eddins, A. C. (2019) Electrophysiological responses to lateral shifts are not consistent with opponent-channel processing of interaural level differences. *Journal of Neurophysiology*, vol. 122, no. 2, pp. 737–748. <https://doi.org/10.1152/jn.00090.2019> (In English)
- Perrott, D. R., Musicant, A. D. (1977) Minimum audible movement angle: Binaural localization of moving sound sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, no. 6, pp. 1463–1466. <https://doi.org/10.1121/1.381675> (In English)
- Petropavlovskaya, E. A., Shestopalova, L. B., Vaitulevich, S. F. (2010) Proyavleniya inertsionnosti slukhvoy sistemy pri lokalizatsii dvizhushchikhsva zvukovykh obrazov maloj dlitel'nosti [Manifestations of the inertia of the auditory system when localizing moving sound images of short duration]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 36, no. 4, pp. 34–43. (In Russian)

- Petropavlovskaja, E. A., Shestopalova, L. B., Vaitulevich, S. F. (2011) Predskazatel'naya sposobnost' slukhovoj sistemy pri pлавnom dvizhenii i skachkoobraznom peremeshchenii zvukovykh obrazov maloj dlitel'nosti [Predictive ability of the auditory system when moving smoothly and hopping sound images of short duration]. *Zhurnal vysshej nervnoj deyatelnosti im. I. P. Pavlova — I. P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*, vol. 61, no. 3, pp. 293–305. (In Russian)
- Roelfsema, P. R., Holtmaat, A. (2018) Control of synaptic plasticity in deep cortical networks. *Nature Reviews Neurosciences*, vol. 19, no. 3, pp. 166–180. <https://doi.org/10.1038/nrn.2018.6> (In English)
- Semenova, V. V., Petropavlovskaja, E. A., Shestopalova, L. B., Nikitin, N. I. (2020) Konstanty vospriyatiya otsrochennogo dvizheniya zvukovykh stimulov [Perception thresholds for sound stimuli with delayed motion onset]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk*, vol. 51, no. 2, pp. 55–67. <https://doi.org/10.31857/S0301179820020095> (In Russian)
- Shestopalova, L. B., Petropavlovskaja, E. A., Salikova, D. A. et al. (2022) Event-related potentials in conditions of auditory spatial masking in humans. *Human Physiology*, vol. 48, no. 6, pp. 633–643. <https://doi.org/10.1134/S0362119722700098> (In English)
- Varfolomeev, A. L., Starostina, L. V. (2006) Slukhovye vyzvannye potentsialy cheloveka pri illyuzornom dvizhenii zvukovogo obraza [Auditory evoked human potentials in the illusory movement of the sound image]. *Rossijskij fiziologicheskij zhurnal im. I. M. Sechenova — Russian Journal of Physiology*, vol. 92, no. 9, pp. 1046–1057. (In Russian)
- Varyagina, O. V. (2001) Otsenka chelovekom nachal'noj točki traektorii dvizheniya zvukovogo obraza [Human evaluation of the starting point of the motion path of the sound image]. *Sensornye sistemy — Sensory Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 324–333. (In Russian)
- Varyagina, O. V. (2005) Otsenka ispytuemymi dliny traektorii dvizheniya slitnogo zvukovogo obraza [Subjective estimation of the trajectory length of fused auditory image movement]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 31, no. 3, pp. 32–38. (In Russian)
- Yost, W. A., Hafer, E. R. (1987) Lateralization. In: W. A. Yost, G. Gourevitch (eds.). *Directional hearing*. New York: Springer Publ., pp. 49–84. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4738-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4738-8_3) (In English)