

УДК 612.85.016.6+612.821.89+534.76+534.771

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА ПО РАССТОЯНИЮ

© 2023 г. И. Г. Андреева^{1,*}, В. М. Ситдииков¹, Е. А. Огородникова²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН

194223 Санкт-Петербург, пр. Тореза, д. 44, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН
199034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6, Россия

*E-mail: ig-andreeva@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

После доработки 02.05.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

В работе представлен обзор современных методов, которых применяют для исследования способности локализации источников звука по расстоянию. Рассмотрены моноауральные и бинауральные признаки локализации. Подробно обсуждается роль бинаурального слуха в оценке расстояния до источника звука. Показано участие признаков локализации в абсолютной и относительной оценке расстояния. Рассмотрены преимущества и ограничения разных экспериментальных подходов к созданию виртуальных звуковых образов. В особом разделе обсуждаются подходы к формированию движущихся звуковых образов. Даны сводные материалы по результатам оценки слуховой разрешающей способности по расстоянию, полученные разными методами для неподвижных и движущихся источников звука. В обзор включены результаты собственных исследований авторов и описание перспективных экспериментальных и прикладных подходов к развитию данного направления.

Ключевые слова: пространственный слух, бинауральный слух, локализация по расстоянию, акустическая виртуальная реальность, разрешающая способность слуха, восприятие движения

DOI: 10.31857/S0235009223030022, EDN: WTAATY

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях, когда большинство населения проживает в городах с интенсивным движением транспорта, состояние пространственного слуха является одним из факторов безопасности жизнедеятельности. Слух обеспечивает дистантный мониторинг всего пространства, окружающего человека, тогда как зрение — только его передней полусферы. Механизмы бинаурального слуха лежат в основе функции слухового внимания и являются основой высокой помехоустойчивости при анализе акустических сигналов, в том числе речи, тем самым обеспечивая важнейшую коммуникативную функцию (Andreeva, 2018; Bronhorst, 2015; Moore, 2012). В то же время вопрос о комплексной количественной оценке базовых показателей пространственного слуха, таких как его разрешающая способность по расстоянию и времени, ответственных за своевременное реагирование человека на опасность путем локализации источника угрозы или критической информации, остается актуальным.

Локализация источников звука по расстоянию является наименее изученным направлением исследований пространственного слуха, несмотря на его важное социально-биологическое значение. В последние два десятилетия локализация по расстоянию интенсивно исследуется, но ряд вопросов остаются еще нерешенными (Kolarik et al., 2016; Moore, 2012; Russel, 2022). С применением ряда новых методических подходов проведена оценка пространственной разрешающей способности слуха, точности ориентации, бинаурального освобождения от маскировки, разборчивости речи при пространственном разделении источников целевого речевого сигнала и шума. Однако несмотря на тщательную проработку таких методик, они так и не были внедрены в широкую исследовательскую и аудиологическую практику по ряду причин. Одной из них является высокая стоимость оборудования и специальных помещений, что лишь отчасти разрешается появившейся в последние годы тенденцией к использованию акустической виртуальной реальности (Bronkhorst, 2015; Carlile, Leung, 2016; Coudert et al., 2022). Вторая очевидная причина связана с боль-

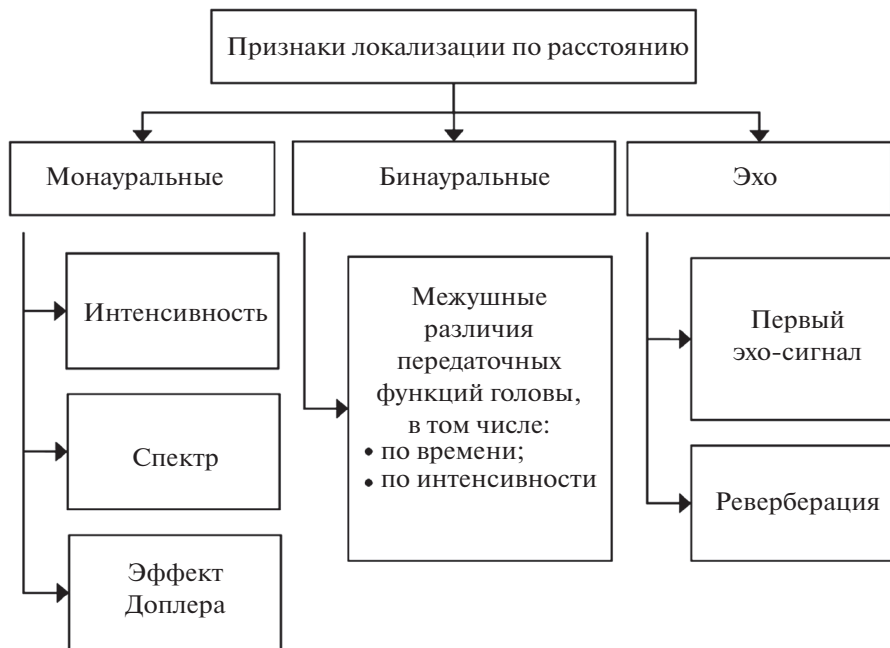


Рис. 1. Основные признаки локализации по расстоянию.

шим числом практических задач, выполняемых пространственным слухом. При описании нормы, ухудшения или утраты способности к выполнению этих задач необходимо оценить большое число параметров. Даже при относительном удешевлении способов определения состояния слуховой пространственной функции ее детальная оценка потребует значительного времени и окажется утомительной как для испытателя, так и для исследователя. Вместе с тем информационные технологии и специализированное программное обеспечение позволяют реализовать адаптивные методы измерения, автоматизировать первичную обработку данных и, таким образом, ускорить и упростить количественную оценку отдельных показателей локализации по разным координатам пространства.

В обзоре дан краткий анализ известных на данный момент признаков локализации по расстоянию для неподвижных и движущихся звуковых источников, а также современных методических подходов к изучению локализации по расстоянию, которые могут быть использованы как в норме, так и при патологии слуховой системы.

ПРИЗНАКИ ЛОКАЛИЗАЦИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СЛУХА ПО РАССТОЯНИЮ

При локализации по расстоянию выделяют ряд акустических признаков, связанных с характеристиками звукового источника и свойствами окружающей среды (рис. 1).

Одни из них являются абсолютными, другие — относительными. Абсолютные признаки локализации позволяют оценить расстояние на основе однократного предъявления звукового сигнала, тогда как относительные признаки определяют возможность различать звуки, поступающие с разных расстояний (Mershon et al., 1989; Aggius-Vella et al., 2022). В условиях свободного поля наиболее важными признаками выступают интенсивность (уровень) сигнала, его спектральная огибающая и бинауральные различия.

Уровень сигнала рассматривают как относительный признак удаленности, эффективный при разном акустическом окружении и в широком диапазоне расстояний (Zahorik et al., 2005; Kolarik et al., 2016). Воспринимаемое расстояние до источника увеличивается при снижении уровня звука, приходящего к слушателю. Поскольку уровень звука — это относительный признак расстояния, то суждения о расстоянии, сделанные исключительно на его основе, могут быть ошибочны в связи с изменением уровня звука самого источника. Оценки абсолютного значения расстояния для неподвижных источников звука в этом случае не будут иметь смысла (Gardner, 1969), в то время как относительные различия в расстоянии до двух или более источников звука могут быть оценены (Zahorik et al., 2005).

В условиях свободного поля уровень звукового давления в месте прослушивания обратно пропорционален квадрату расстояния до его источника, если последний можно рассматривать как точечный, и снижается примерно на 6 дБ при

удвоении удаленности (Coleman, 1963). Очевидно, что эта закономерность не выполняется для объемных источников звука, таких как водопад, оживленное шоссе, системы промышленной вентиляции и другие. В замкнутом пространстве с отражениями (например, в комнате) уровень звука в месте прослушивания зависит от его акустических характеристик, что может значительно облегчать оценку расстояния (Kolarik et al., 2016).

В случае относительной оценки расстояния можно предположить, что минимальное различие в нем определяется дифференциальными порогами уровня звука, тогда разрешение по расстоянию должно составлять от 5 до 25% от эталонного расстояния в зависимости от спектрально-временных характеристик стимулов. Для посылок белого шума дифференциальные пороги по расстоянию равны 6% (Ashmead et al., 1990). Для других категорий стимулов они находятся в диапазоне от 13 до 25% (Edwards, 1955; Simpson, Stanton, 1973; Akeroyd et al., 2007). Эти оценки означают, что пространственное разрешение по расстоянию и разрешение по уровню звука имеют близкие значения и, вероятно, тесно связаны.

Другим признаком локализации по удаленности являются особенности спектра. Принято считать, что спектральная огибающая сигнала изменяется при расстояниях между источником звука и слушателем превышающих 15 м (Blauert, 1997), а также в периперсональном пространстве в пределах 1 м (Brungart, Rabinowitz, 1996; Корџо, Shinn-Cunningham, 2011). Причем для точной оценки расстояний в пределах 1 м большее значение имеет наличие в сигнале спектральных компонент в области частот ниже 3 кГц (Brungart, Rabinowitz, 1999), чем ширина диапазона его спектра (Корџо, Shinn-Cunningham, 2011). В диапазоне 1–15 м спектральные признаки не играют решающей роли, так как потеря энергии в высокочастотной области и изменения, возникающие в низкочастотной области спектра сигнала в результате дифракции, оказываются недостаточными выраженными, чтобы их обнаружить.

При восприятии движущегося источника звука может быть обнаружено смещение спектра в сторону более высоких частот при его приближении и смещении спектра в сторону низких частот — при удалении (Rosenblum et al., 1987). Таким образом, в случае тональных и узкополосных сигналов и достаточно высоких скоростей движения источника, сопоставимых со скоростью звука, проявление эффекта Доплера также может служить признаком локализации. Для выяснения влияния спектральной информации на оценку скорости движения источника звука слушателей просили оценить время прибытия для источников девяти вариантов полосовых шумовых стимулов (однооктавная полоса частот в диапазоне от

40–80 Гц до 10–20 кГц) (Gordon et al., 2013). Показано, что слушатели склонны недооценивать время прибытия приближающегося источника звука. При этом для стимулов, которые представляли собой полосовые шумы с центральными частотами от 120 до 250 Гц, наблюдалась минимальная недооценка скорости изменения расстояния до источника, а для шумовых стимулов с центральными частотами от 2000 до 7500 Гц — максимальная.

Исследование влияния бинауральных признаков локализации — межушных различий по времени (МРВ) и интенсивности (МРИ), на восприятие удаленности источника звука является наиболее сложной методической задачей. В одной из первых теоретических работ (Hartley, Fry, 1921) было обосновано положение, согласно которому расстояние до источника чистого тона при его удаленности порядка 1 м может быть оценено с использованием межушных различий по интенсивности. Однако экспериментальная проверка показала, что слушатели не способны оценить расстояние до источника чистого тона (Wightman, Firestone, 1930). Позднее было сформировано представление о том, что оценка расстояния возможна при комбинировании информации о МРИ и МРВ (Hirsch, 1968). При малых расстояниях до источника звука углы, под которыми звуковые волны приходят на левое и правое уши слушателя (углы раскрытия), различаются (Ashmead et al., 1990). Это явление называется акустическим параллаксом. Показано, что с учетом акустического параллакса виртуальные расстояния могут оцениваться слушателями до 1 м, а при больших расстояниях измеренные передаточные функции существенно не изменяются (Kim et al., 2001; Otani et al., 2009). Различия в углах раскрытия при акустическом параллаксе для расстояния 1 м составляют около 5°, тогда как точность различения азимутальных углов — 1°. Известно, что слуховая система имеет наибольшее разрешение по азимуту при 0° азимута, т.е. тогда, когда меж-ушные различия минимальны (Blauert, 1997). Углы раскрытия порядка 1° достигаются на расстояниях 4–5 м, соответствующих акустическому горизонту — расстоянию, начиная с которого происходит значительная недооценка расстояния (Haustein, 1969; Mershon, Bowers, 1979). Возможность влияния угла раскрытия на характеристики пространственной избирательности по расстоянию показана при удаленности целевого источника речи от 1 до 4 м от слушателя в условиях свободного поля (Andreeva et al., 2019). Таким образом, гипотеза о том, что изменение угла раскрытия может являться бинауральным признаком, который существенно влияет на оценку расстояния при расстояниях до 4–5 м, имеет не только теоретическое, но и экспериментальное обоснование.

В исследованиях последних лет большое внимание уделено локализации звука в замкнутых помещениях (Marroni et al., 2008; Westermann, Buchholz, 2013; Chabot-Leclerc et al., 2016; Kolarik et al., 2016). В этих условиях возникают эхо-сигналы, первый из которых дает важную информацию о расположении источника. Эхо-сигналы при множественных отражениях (реверберации) формируют в замкнутом помещении стоячие волны, характеристики этого процесса влияют на оценку положения источника звука. Подробный анализ признаков локализации по слуху для человека, в том числе при оценке расстояния, выполнен в обзорах (Zahorik et al., 2005; Ahveninen, 2014; Kolarik et al., 2016); для человека и животных – в обзоре (Naguib, Wiley, 2001). Завершая краткое рассмотрение признаков локализации, заметим, что при норме бинаурального слуха ориентация головы (Cochran et al., 1968; Holt, Thurlow, 1969) и ее движения (Gardner, 1969; Simpson, Stanton, 1973; McAnally, Martin, 2014) не оказывают существенного влияния на оценку расстояния до источника звука.

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ДО НЕПОДВИЖНОГО ИСТОЧНИКА ЗВУКА

В психофизических исследованиях оценки расстояния до источника звука применяют два основных методических подхода (Андреева, 2004а). Первый подход основан на предъявлении звука в пространстве через громкоговорители в условиях анехоидной камеры (свободное звуковое поле) или же в помещении с известными характеристиками реверберации. Второй подход использует признаки локализации источника звука по расстоянию при стимуляции через головные телефоны, поскольку он удобен для применения в помещениях любого объема, и результат не зависит от их акустических характеристик.

Первый подход применяется с 60-х годов прошлого века (Coleman, 1963). Он подразумевает использование реального источника звука. В литературе описано большое количество исследований восприятия расстояния до неподвижного источника звука, проведенных в различных условиях – в свободном поле и в замкнутом помещении, а также для разных типов стимулов: тональные, шумовые посылки, речь и речеподобные сигналы (Zahorik et al., 2005; Kolarik et al., 2016). Для оценки абсолютного расстояния до источника звука в условиях свободного поля исследователи применяли один громкоговоритель, который последовательно располагали на заданных расстояниях от слушателя (Strybel, Perrott, 1984; Ashmead et al., 1990; Simpson, Stanton, 1973).

Оценка человеком абсолютного расстояния до источника звука, по-видимому, требует опоры на

априорные знания. Информация об абсолютном расстоянии может быть доступна слушателю в помещении со знакомыми ему характеристиками реверберации. При изучении такой оценки испытуемых просили определить абсолютное расстояние до источников широкополосного шума, которыми служили громкоговорители, расположенные от головы слушателя на расстояниях 2–5.5 м (Mershon, King, 1975), а также 0.55, 1, 2, 4 и 8 см (Mershon, Bowers, 1979). В другой работе (Simpson, Stanton, 1973) применяли один громкоговоритель, который располагали на заданных расстояниях от слушателя в интервале от 0.3 до 2.5 м. Слушатели оценивали расстояние в баллах от “0”, что соответствовало положению самого слушателя, до “100”, что в свою очередь соответствовало самому дальнему положению источника. Во всех трех исследованиях наблюдали устойчивую взаимосвязь между ответами испытуемых и расстоянием до источника: чем дальше находился громкоговоритель, тем большее число баллов называли испытуемые. В ближнем поле до 1 м бинауральные признаки играют особую роль в оценке расстояния, они формируются на основе передаточных функций, которые обусловлены анатомическими особенностями конкретного человека. Поэтому человек, опираясь на свой прежний опыт, оказывается способен оценивать абсолютное расстояние до источника звука (Hirsch, 1968; Molino, 1973; Lambert, 1974).

В исследовании способности к относительным оценкам расстояния, которые характеризуются значениями дифференциальных порогов, обычно применяют пару громкоговорителей. Один из них находится на эталонном расстоянии от слушателя, а другой может быть установлен на заданном расстоянии от первого. Реже используют единственный перемещаемый вручную (Simpson, Stanton, 1973) или автоматический (Guo et al., 2019) громкоговоритель. При оценке относительных порогов по расстоянию задействуют процедуры “пространственного деления пополам” (spatial bisection task), и “минимально воспринимаемого различия по расстоянию” (minimum audible distance discrimination task) (Aggius-Vella et al., 2022). В последней процедуре используется эталонный источник звука, который занимает центральную позицию в диапазоне измеряемых эгоцентричных расстояний. В такой процедуре испытуемый оценивает степень близости к нему положения тестового источника. Оценка минимально воспринимаемого различия по расстоянию до реального звукового источника позволяет получить пороговые характеристики локализации у человека.

Решение вопроса о разрешающей способности по расстоянию в условиях свободного поля возможно с применением виртуальных звуковых образов. Два сигнала, различающихся только по

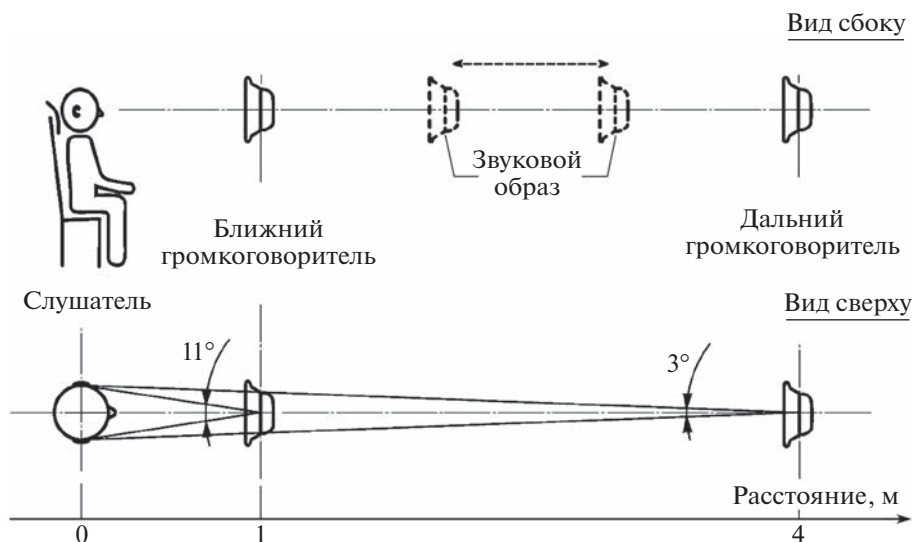


Рис. 2. Формирование звукового образа в модели, в которой расстояние от слушателя до моделируемого источника звука определяется балансом уровней сигналов (БУС), подаваемых на громкоговорители, расположенные на сагиттальной оси на удалении 1 м (угол раскрытия 11°) и 4 м (угол раскрытия 3°).

амплитуде и поданные через неподвижные громкоговорители, установленные на разных расстояниях от слушателя, могут сформировать неподвижный звуковой образ, расположенный между громкоговорителями (рис. 2).

Слушатель оценивает положение виртуально-го источника в зависимости от того, каково соотношение амплитуд сигналов, исходящих от каждого из громкоговорителей. В работе (Andreeva et al., 2020) в качестве сигналов применяли последовательности широкополосных шумовых посылок длительностью 1 с. Изменяли соотношение амплитуд сигналов на громкоговорителях с шагом в 1 дБ. Это позволяло формировать звуковые образы, локализуемые на разных расстояниях в диапазоне, ограниченном положениями громкоговорителей. В описываемой работе применяли положения громкоговорителей на расстоянии от слушателя 1 и 4 м. Положение виртуального звукового образа определялось суммарным уровнем сигнала, приходящим в место расположения головы от каждого из громкоговорителей. Заметим, что в данной модели задействованы бинауральные признаки локализации. Как демонстрирует вид сверху, слушатель получает информацию о направлениях прихода звука, различных для левого и правого уха. Эта информация суммируется для обоих громкоговорителей. В зависимости от соотношения уровней сигнала изменяется доля информации о ближнем или дальнем расположении источника.

Таким образом, данная модель имеет ряд преимуществ: она позволяет практически произвольно менять структуру и положение виртуального источника. Ограничение состоит в диапазо-

не расстояний. Однако с учетом представления о том, что бинауральные признаки эффективны на расстояниях до 4–5 м, ее использование оказывается оптимальным для решения широкого круга задач по локализации источников звука. Этот методический прием, наряду с адаптивной процедурой оценки порогов по расстоянию, был оформлен в виде патента РФ (Андреева и др., 2021).

Исследования, которые проводят в помещениях с особыми требованиями к акустическим характеристикам, достаточно затратны в организации. Поэтому с 90-х годов прошлого века преимущественно применяется другой подход, использующий подачу сигналов в головные телефоны (Wenzel et al., 1993; Begault et al., 2001). При подаче сигналов в головные телефоны можно использовать отдельные признаки локализации по удаленности, однако сигнал будет восприниматься как звучащий внутри головы, т.е. интернализированный. Такой эффект наблюдался, в частности, при использовании единственного монаурального признака расстояния – изменения уровня звука (Neuhoff, 1998). Для решения этой проблемы используют разные приемы. Например, применяют предварительную запись (метод ПЗ) сигналов от реальных источников звука, расположенных в помещениях с заданными характеристиками, в том числе в условиях свободного поля (Butler et al., 1980; Lounsbury, Butler, 1979; Akeroyd et al., 2007). Запись производят при помощи двух микрофонов, расположенных в ушных раковинах манекена, что позволяет зарегистрировать сигналы с акустическими характеристиками, близкими к сигналам, формирующимся у барабанной перепонки человека. При воспроизведении запи-

сей сигналов через головные телефоны слушатель воспринимает их исходящими из внешнего пространства (эффект экстернализации). Таким образом, бинауральная информация помогает экстернализовать звуки, слышимые в головных телефонах, а уменьшение бинауральной информации снижает перцептивный эффект экстернализации (Catic et al., 2013; Hartmann, Wittenberg, 1996).

При использовании манекена точное соблюдение пространственной топики невозможно вследствие индивидуальных анатомических особенностей ушной раковины (Wenzel et al., 1993). Аналогичная проблема искажения акустического пространства по причине индивидуальных особенностей анатомии возникает при применении технологии передаточных функций головы (head related transfer functions, HRTF). Последний метод получил широкое распространение при моделировании виртуального акустического пространства. В этом случае при предъявлении звуковых сигналов в головные телефоны также формируются экстернализованные слуховые образы (Best et al., 2020). Передаточные функции (метод ПФ) описывают акустическую функцию передачи между точечным источником звука в свободном поле и определенным положением микрофона-приемника в ушном канале слушателя (Møller et al., 1995). Поскольку все акустические признаки локализации реальных источников звука содержатся в передаточных функциях головы, то они используются для синтеза виртуальных звуковых образов, воспроизводимых через головные телефоны или громкоговорители (Risoud et al., 2018; Zhong, Xie, 2014). Синтез виртуальных звуковых образов выполняли двумя способами: проводили теоретическое моделирование искажений, вносимых головой слушателя в звуковые волны, приходящие на правое и левое уши слушателя (Duda, Martens, 1998; Shinn-Cunningham et al., 2000); применяли результаты экспериментального измерения этих искажений при помощи манекенов KEMAR (Brungart, Rabinowitz, 1999; Calamia, Nixson, 1997; Корчо, Shinn-Cunningham, 2003). Моделирование искажений оказалось полезным при изучении влияния реверберации на оценку расстояния в замкнутых помещениях (Shinn-Cunningham et al., 2005). Применение манекенов позволило исследовать акустический параллакс в условиях свободного поля (Brungart, Rabinowitz, 1999).

Передаточные функции головы уникальны для каждого человека из-за индивидуальной анатомии и, особенно, геометрии ушной раковины. Использование чужих (неиндивидуализированных) передаточных функций головы может снижать точность локализации и воспринимаемую экстернализацию (Middlebrooks, 1999; Begault et al., 2001; Armstrong et al., 2018; Best et al., 2020; Jenny, Reuter, 2020). Для снижения влияния этого нега-

тивного эффекта применяют специально обработанные посредством сглаживания или усреднения неиндивидуализированные передаточные функции головы (Yu, Wang, 2019; Rummukainen et al., 2021). В одних работах (Begault et al., 2001; Oberem et al., 2020) отмечается небольшое различие в точности локализации между индивидуальными и усредненными передаточными функциями головы. В то же время показано значительное улучшение точности локализации при использовании индивидуальных передаточных функций головы по сравнению с усредненными (Jenny, Reuter, 2020; Pelzer et al., 2020).

Формирование в виртуальной акустической среде источников звука, расположенных в дальнем поле, т.е. при расстоянии между источником и слушателем, превышающем 1 м, производится путем подстройки уровня звука согласно закону обратных квадратов, поскольку измеряемые передаточные функции головы дальнего поля мало меняются с расстоянием (Zhang et al., 2019). Напротив, в ближнем поле, при расстоянии менее 1 м, источники звука моделируют методом ПФ, поскольку они существенно различаются в зависимости от расстояния (Brungart, Rabinowitz, 1999; Liu, Xie, 2013), о чем мы уже писали в предыдущем разделе.

Наряду с моделированием акустического пространства, воспроизводящего условия свободного поля, применяют другую технологию, которая позволяет имитировать в головных телефонах акустическую среду с различными характеристиками отражающих поверхностей. Бинауральные импульсные характеристики помещения (BRIR) дают информацию об акустическом пространстве, доступную слушателю для данного источника звука в конкретной окружающей среде (Shinn-Cunningham et al., 2005; Корчо, Shinn-Cunningham, 2011). Таким образом, формирование виртуальной акустической среды при стимуляции через головные телефоны является в настоящий момент наиболее доступным и часто применяемым подходом для проведения психоакустических исследований в области пространственного слуха (Moore, 2012; Best et al., 2020).

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ДО НЕПОДВИЖНОГО ИСТОЧНИКА ЗВУКА ПО СЛУХУ

Изучение восприятия расстояния по слуху проводят как для неподвижных, так и для движущихся источников звука. Использование движения реальных источников звука в психофизических экспериментах сопряжено с целым рядом технических трудностей, связанных с обеспечением нужных характеристик движения, требований бесшумности, поэтому они используются

крайне редко. Примером организации реального движения источников являются две ранние работы (Edwards, 1955; Simpson, Stanton, 1973). В этих работах громкоговоритель, служивший источником звука, передвигали вручную, что не позволяло надежно контролировать скорость перемещения. Точный автоматизированный контроль перемещения громкоговорителя был реализован в установке, описанной в работе (Guo et al., 2019), однако она не была использована для исследования движения. Метод реального перемещения источника позволяет воспроизвести движение в окружающей среде при неизбежном ограничении используемых параметров движения и характеристик источника, а также их быстрого изменения, требуемого в эксперименте. Поэтому исследователи отдают предпочтение созданию иллюзий движения звуковых образов.

Как уже упоминалось, одним из основных признаков для оценки расстояния по слуху является уровень звукового давления в точке прослушивания (Warren, 1999). Этот признак возникает при реальном перемещении источника звука или его можно моделировать различными способами, создавая иллюзию приближения или удаления источника. Возрастание амплитуды звуковых посылок приводит к появлению иллюзии приближения звукового источника, а уменьшение — к иллюзии его удаления. При этом организация виртуального приближения и удаления звукового источника может быть различной — в условиях интернализации звукового образа внутри головы (Кожевникова, 1985; 1989; Neuhoff 1998; Вартамян и др., 1999; Seifritz et al., 2002); при манипулировании амплитудой сигнала, подаваемого на единственный громкоговоритель, расположенный на некотором расстоянии от слушателя (Вартамян, Черниговская, 1980; Кожевникова, 1980); при помощи динамиков, фиксирующих начальную и конечную точки траектории движения (Пак, Огородникова, 1997; Андреева, Альтман, 2001); при подаче в головные телефоны предварительно записанных и обработанных методом ПФ движущихся звуковых сигналов (Lundbeck et al., 2017; Akeroyd et al., 2007).

Изменение спектра сигнала также может являться признаком перемещения источника звука. В работе (Vartanyan, Andreeva, 2007) были определены оптимальные параметры для создания иллюзии движения звукового источника по радиальной координате при помощи частотной модуляции. Изменение частоты линейно от 500 до 1000 Гц приводило к формированию иллюзии удаляющегося источника звука, а от 1000 до 500 Гц — приближающегося. Возможно, эти иллюзии возникают в результате изменения соотношения в спектре передаточных функций при увеличении и уменьшении расстояния до источника (Brungart, Rabinovich, 1999). В работах (Вартамян

и др., 1999; Vartanyan, Andreeva, 2007) отмечалось улучшение качества имитируемого движения при сочетании изменения спектра и уровня сигнала.

Возможно создание иллюзий движения, которые воспроизводят бинауральные признаки. Для этих целей применяли установки, включающие пару громкоговорителей, расположенных по одному спереди и сзади от слушателя на одной оси (Пак, Огородникова, 1997) или перед слушателем на разных расстояниях от него (Андреева, Альтман, 2001). Расстояние от слушателя до моделируемого неподвижного источника звука (неподвижного звукового образа) определялось балансом уровней сигналов, подаваемых на громкоговорители (модель БУС).

Иллюзия непрерывного движения возникала у слушателя при восприятии звуковых стимулов от разнесенных в пространстве источников, если интервал между стимулами находится в диапазоне, обеспечивающем ощущение слитного звучания. Межимпульсный интервал должен быть небольшим до 100 мс (Strybel et al., 1990), причем он зависит от длительности звуковых импульсов. При увеличении длительности импульсов возрастает значение межимпульсного интервала, достаточного для восприятия движения как непрерывного (Андреева, Гвоздева, 2015).

В работе (Altman, Andreeva, 2004) громкоговорители располагали на расстоянии 1 и 4 м на уровне головы слушателя. Имитация приближения звукового образа создавалась при одновременном увеличении амплитуды сигнала на ближнем громкоговорителе и уменьшении амплитуды на дальнем. Изменение амплитуд в обратную сторону приводило к возникновению эффекта удаления. Данная модель была ограничена диапазоном расстояний, но позволяла задавать различные параметры движения звуковых образов (скорость движения, его продолжительность, спектральная и временная структура моделируемого источника звука), благодаря чему с ее помощью удалось оценить ряд важных показателей. Измеряли пороговую длительность звукового образа для обнаружения движения и различения его направления под разными азимутальными углами (Андреева, Альтман, 2001); пороговую длительность звуковых источников разного спектрального состава (Андреева, 2004б); дифференциальные пороги по расстоянию для стимулов различного спектрального состава (Андреева и др., 2014); дифференциальные пороги для непрерывных и прерывистых звуковых образов (Гвоздева, Андреева, 2016). Изменение спектрального состава позволило промоделировать потери слуха на высоких частотах, характерные для умеренной сенсоневральной тугоухости (СНТ). С этой целью из спектра широкополосных шумовых последовательностей удаляли частотные составля-

ющие выше 3000 Гц (Андреева, 2004б; Андреева и др., 2014) или спектр сигнала фильтровали в соответствии с типичной аудиограммой при умеренной СНТ (Андреева и др., 2018; Гвоздева, Андреева, 2019). У данного метода есть ограничения на параметры воспроизводимых стимулов, которые связаны с геометрическими размерами установки. Длина траектории и скорость движения звукового образа ограничены расстоянием между громкоговорителями (в представленных работах порядка трех метров). Если учесть, что для обнаружения движения требуются длительности стимулов более 100 мс, то скорость не может превышать 30 м/с.

Формирование движущихся звуковых образов, предъявляемых слушателю через головные телефоны, реализуется сложнее, чем неподвижных, поскольку необходимо имитировать изменения параметров звуковой волны, вызванных движением источника звука. В работе (Lundbeck et al., 2017) описывается создание сложной акустической среды, в которой присутствовали движущиеся звуковые образы. Авторы отмечают, что в отличие от случая неподвижных звуковых образов, моноaurальные спектральные изменения играют существенную роль в восприятии движения источника в ревербирующих средах, а влияние реверберации на восприятие движущегося и неподвижного источника звука отличается.

Способ моделирования движения в виртуальной акустической среде посредством передаточных функций головы имеет свои недостатки. В-первых, это точность измерения передаточных функций головы (Отани et al., 2009) Во-вторых, необходимость восстанавливать зависимость передаточных функций головы от расстояний, для чего используются различные методические приемы, а звуковые образы, созданные с их помощью, неодинаково локализируются слушателями (Zhang et al., 2019). В-третьих, существует проблема неточного совмещения наушников и слуховых проходов, которая может существенно и неконтролируемо влиять на бинауральные временные различия. Заметим, что и при прослушивании виртуальных моделей в свободном пространстве через громкоговорители остается задача контроля взаимного расположения головы слушателя и источников звука.

При проведении психоакустических исследований важен опыт испытуемого в прослушивании сигналов в конкретных экспериментальных условиях. Априорная информация о характеристиках источника звука и акустической среды также может существенно влиять на слуховое восприятие расстояния. Слушатель в незнакомой обстановке, который впервые слышит источник звука, имеет мало надежных признаков, чтобы судить о расстоянии до этого источника. Однако его спо-

собность обрабатывать информацию о расстоянии улучшается после прослушивания повторяющихся стимулов от одного и того же источника звука на разных расстояниях (Coleman, 1962; Ahveninen, 2014).

ПОКАЗАТЕЛИ ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕПОДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

Метрика слухового пространства основана на опыте в локализации неподвижных источников звука. Эта метрика формируется в онтогенезе неразрывно со зрительными оценками расположения звучащих объектов (Aggius-Vella et al., 2022). При этом при ориентации в пространстве зрительная модальность является ведущей по отношению к слуховой, что подтверждается многочисленными наблюдениями, включая такой известный эффект, как чревовещание (Jack, Thurlow, 1973; Bertelson, Radeau, 1981). Этот эффект заключается в том, что источнику звука приписывается положение в пространстве, которое было определено при помощи зрения. Колебание было продемонстрировано, что расстояние до источника звука определяется испытуемым с учетом видимого им ближайшего вероятного источника (Coleman, 1962). В данной работе также было показано, что коррекция в оценке удаленности источника может быть сделана при прослушивании ранее известных звуков, по-видимому, с учетом изменения их акустических характеристик. О взаимодействии зрения и слуха в процессе ориентации свидетельствует ориентировочный рефлекс, который заключается в повороте головы и глаз на новый источник звука. Он демонстрирует необходимость уточнения слуховой информации о положении объекта с участием зрения. Таким образом, оценка расстояния до видимых источников звука осуществляется при активном участии зрения. Важную роль в определении глубины пространства для обеих дистантных сенсорных систем играет билатеральная симметрия органов чувств.

Бинауральный слух не только позволяет определить то, под каким азимутальным углом приходит информация об источнике звука, но и участвует в оценке глубины пространства, особенно в отношении задней полусферы. Наличие достаточной бинауральной информации в передаточных функциях было доказано экспериментально. В условиях свободного поля была проведена оценка различий сигналов, поступающих на правое и левое ухо манекена, при расстояниях до источника менее 1 м (Brungart, Rabinowitz, 1999). При больших расстояниях измерение передаточных функций не выявляет значимых различий. Это обстоятельство противоречит экспериментальным данным о том, что субъективная оценка расстояния качественно меняется только при

удаленности источника звука более 4–5 м (Gardner, 1969; Kolarik et al., 2016; Moore, King, 1999; Simpson, Stanton, 1973). В этих работах было показано, что расстояния от слушателя до источника в диапазоне до 4–5 м переоцениваются, при больших расстояниях, наоборот, наблюдается их недооценка, которая усиливается с увеличением расстояния. Расчетная оценка углов прихода звука на левое и правое уши при разной удаленности его источника была выполнена на основе разрешающей способности слуховой системы по азимуту (Andreeva et al., 2019). Она показала, что диапазон расстояний, на котором раскрытие угла падения на левое и правое ухо превышает порог разрешения по азимуту, составляет не 1 м, а 4–5 м.

Условия стимуляции, при которых наблюдалось наиболее точное соответствие между реальным расстоянием до источника звука и оценкой расстояния до него, были определены в работе (Korčič, Shinn-Cunningham, 2011): дистанция до источника, не превышающая 2 м; широкополосный спектральный состав сигнала; прослушивание в условиях помещения с реверберацией. С увеличением расстояния до десятков метров недооценка расстояния возрастает настолько, что обсуждается гипотеза о существовании акустического горизонта — точки пространства, далее которой испытуемый не может определять реальное расстояние до звукового источника (von Bekesy, 1949). Проверка этой особенности локализации по удаленности проводилась многократно (Fontana, Rocchesso, 2008; Kearney et al., 2012; Parsehian et al., 2014; Zahorik, 2002; Zahorik et al., 2005; Zahorik, Wightman, 2001; Kolarik et al., 2016; Kolarik et al., 2020).

Как упоминалось ранее, в условиях свободного поля, согласно модели точечного источника, по мере увеличения удаленности слушателя до источника звука потери уровня звукового давления оцениваются в 6 дБ при каждом удвоении расстояния (Coleman, 1963). В психофизических исследованиях было показано, что величины изменения уровня сигнала, вызывающие ощущение увеличения расстояния до неподвижного источника звука в 2 раза, оказываются значительно больше и составляют от 9 до 30 дБ (Begault, 1991; Gardner, 1969; Mershon, King, 1975; Petersen, 1990; Stevens, Guirao, 1962; Warren, 1977). Эти величины могут быть обусловлены отличием реального звукового источника от точечной модели, для которой выполняли расчет.

При ориентации в пространстве, помимо точности локализации по расстоянию, часто приходится решать задачу пространственного разрешения для пары акустических объектов. Исследование дифференциальных порогов по расстоянию с применением метода границ было выполнено для стимулов, представляющих собой широкополос-

ные шумы или тоны (Simpson, Stanton, 1973; Strybel, Perrott, 1984; Ashmead et al., 1990). В первой работе при локализации источников тональных звуков относительные дифференциальные пороги составляли от 13 до 33% для эталонных расстояний 0.5–2 м, причем с увеличением эталонного расстояния относительные пороги уменьшались. В работе (Strybel, Perrott, 1984) дифференциальные пороги по расстоянию в помещении с реверберацией определяли для неподвижных источников широкополосных сигналов в диапазоне расстояний 0.5–3 м. Результаты оценивались в 9–20%. В работе (Ashmead et al., 1990), которая проводилась в условиях анэхоидной звукоизолированной камеры, для источников широкополосного шума в диапазоне частот 100–8000 Гц были получены значения относительных дифференциальных порогов около 5% при базовых расстояниях 1 и 2 м. Таким образом, дифференциальные пороги слуха по расстоянию до источников широкополосного шума зависели от спектрального состава их сигналов. Они оказались меньше, чем для источников тональных посылок. Увеличение расстояния до звукового источника приводило к снижению относительных дифференциальных порогов, в то время как абсолютные пороги оставались постоянными.

На результаты оценки пространственной разрешающей способности влияет и способ формирования удаленных звуковых стимулов. Помимо применения реальных источников звука возможно использование виртуальной реальности, т.е. создание звуковых образов в свободном поле или при подаче сигналов в головные телефоны. Например, в работе (Akeroyd et al., 2007) воссоздавали акустику помещения с заданными размерами и параметрами реверберации (модель ПЗ). Затем полученные бинауральные сигналы подавали слушателю через головные телефоны, что позволяло проводить исследование в небольшом помещении с любыми реверберационными характеристиками, но исключало возможность сканирования пространства с участием небольших движений головы и могло в принципе приводить к ухудшению локализации (Perrott et al., 1987). Полученные дифференциальные пороги по расстоянию для источников речи у слушателей с нормальным слухом составили около 25%, как при изменении уровня звука, так и при выравненной интенсивности звукового сигнала при расстояниях 2 и 5 м. В другой работе моделирование звукового образа выполняли в свободном пространстве (Andreeva et al., 2020). Расстояние от слушателя до моделируемого неподвижного источника звука (неподвижного звукового образа) определялось балансом уровней сигналов, подаваемых на громкоговорители, расположенные перед испытуемым на расстоянии 1 и 4 м (модель БУС). Голова слушателя фиксировалась положе-

Таблица 1. Дифференциальные пороги по расстоянию для различных моделей неподвижных источников звука

Метод (модель)	Тип стимулов	Величина порогов (эталонное расстояние)	Условия измерений	Источник данных
РИЗ	Шумовые	19% (0.49 м) 11% (1.52 м) 9% (3.04 м) 6% (6-49 м)	Свободное поле (спортивная площадка, 140 × 160 м) —	Strybel, Perrott, 1984
РИЗ	Шумовые	6% (1 и 2 м) 16% (1 и 2 м)*	Свободное поле —	Ashmead et al., 1990
РИЗ	Шумовые	11% (0.5 м) 30% (0.5 м)* 9% (1 м) 30% (0.5 м)*	Свободное поле — — —	Guo et al., 2019
ПЗ	Речевые	25% (2 и 5 м)	Головные телефоны в заглушенной комнате	Akeroyd et al., 2007
ПФ	Речевые	25% (2 м) 12% (5 м) 30% (2 м) 12% (5 м) 30% (2 м) 25% (5 м)	Головные телефоны $T_{60} = 0.7$ с $T_{60} = 0.4$ с $T_{60} = 0$ с — —	Kolarik et al., 2013
БУС	Шумовые	9% (2.5 м)	Свободное поле	Andreeva et al., 2020

Обозначения: * — для данных измерений признак локализации по интенсивности устранен путем выравнивания уровней звукового давления (уровней сигналов) в точке прослушивания; ПФ — метод (модель) передаточных функций; ПЗ — метод предварительной записи; РИЗ — реальный источник звука; БУС — модель, в которой расстояние от слушателя до моделируемого источника звука (неподвижного звукового образа) определялось балансом уровней сигналов, подаваемых на громкоговорители.

нием на подголовнике, что не исключало ее микродвижений. Пороги по расстоянию для неподвижных источников звука составили в среднем по группе слушателей 9%, а минимальное и максимальное индивидуальные значения этого порога были равны 6 и 16% соответственно. Величина порогов по расстоянию, полученная этим методом, соответствовала принятым ранее данным для широкополосных источников звука (Strybel, Perrott, 1984). Сравнение результатов двух способов создания виртуального акустического пространства демонстрирует существенные различия в разрешающей способности слуха и указывает на потерю точности в модели, использующей головные телефоны. Дифференциальные пороги по расстоянию для различных моделей неподвижных источников звука представлены в табл. 1.

ПОКАЗАТЕЛИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

Пороги по расстоянию измеряют при сравнении положения пары неподвижных источников звука, в то время как разрешающая способность для движущегося источника определяется по способности оценить направление его движения, т.е. способности сравнить положение начальной

и конечной точки траектории. Оценка динамических изменений в сигнале предполагает выполнение слушателем временного слухового анализа изменений, возникающих при перемещении источника звука. Пороги по расстоянию, полученные для приближающихся источников звука у испытуемых с нормальным слухом в модели БУС с применением адаптивной процедуры оценки порогов, были равны по средним данным 14% (Andreeva et al., 2020). Минимальное и максимальное индивидуальные значения порога по расстоянию для движущихся источников при норме слуха испытуемых равнялись 7 и 23%. Сравнение разрешающей способности неподвижных и движущихся источников звука показывает, что она ухудшается при движении, причем внутригрупповая вариабельность величины порога при движении источников звука оказывается выше, чем при их неподвижном положении. Пороги по расстоянию, полученные в модели БУС с участием другой группы испытуемых и применением метода постоянных рядов, при приближении звукового образа были равны 19%, при удалении — 15% (Gvozdeva, Andreeva, 2019). Пороги приближения и удаления звукового образа не различались между собой при учете смещения точки субъективно-нуля. Данный эффект состоит в том, что около-

Таблица 2. Дифференциальные пороги по расстоянию для различных моделей движения источников звука

Метод (модель)	Тип стимулов	Величина порогов (эталонное расстояние)	Условия измерений	Источник данных
РИЗ	Метроном, часы	55% (1 м) 22% (8 м)	Комната без оценки реверберации	Edwards, 1955
РИЗ	Тональные	33% (0.61 м) 19% (1.24 м) 13% (2.13 м)	Звукозаглушенная комната – –	Simpson, Stanton, 1973
БУС	Шумовые	14% (2.5 м)	Свободное поле	Andreeva et al., 2020
БУС	Шумовые: а) приближение б) удаление	19% (2.5 м) 14% (2.5 м) 15% (2.5 м) 10% (2.5 м)	Свободное поле первое прослушивание второе прослушивание первое прослушивание второе прослушивание	Gvozdeva, Andreeva, 2019
ПФ	Шумовые	40% (1 м) 50% (1 м)	Свободное поле помещение с реверберацией	Lundbeck et al., 2017

Обозначения: ПФ – метод (модель) передаточных функций; ПЗ – метод предварительной записи; РИЗ – реальный источник звука; БУС – модель, в которой расстояние от слушателя до моделируемого источника звука (звукового образа) определялось балансом уровней сигналов, подаваемых на громкоговорители.

пороговые звуковые образы чаще оцениваются слушателем как приближающиеся. Такая асимметрия в оценках была неоднократно показана при имитации движения увеличением уровня сигнала (Hall, Moore, 2003; Neuhoff, 1998).

Пороги по расстоянию для движущихся источников звука были определены при подаче бинауральных сигналов в головные телефоны с применением метода ПФ (Lundbeck et al., 2017). Полученные пороги для эталонного начального расстояния в 1 м при норме слуха составили около 40% в случае модели движения в свободном поле и около 50% при моделировании движения в помещении с реверберацией. Сравнение результатов, полученных разными способами моделирования движения – ПФ и БУС, позволяет считать, что при оценке разрешающей способности движущихся звуковых источников так же, как и в случае применения метода ПЗ для неподвижных источников, пороги, измеренные методом ПФ, оказываются значительно завышенными. Возможной причиной являются сложности, возникающие при экстернализации источников звука, т.е. при формировании звукового образа вне головы при стимуляции через наушники. Угловые координаты этим методом могут быть воспроизведены с удовлетворительной точностью, однако формирование глубины акустического пространства вызывает существенные затруднения (Best et al., 2020). Дифференциальные пороги по расстоянию для различных моделей движения источников звука представлены в табл. 2.

Взаимосвязь механизмов локализации неподвижных и движущихся источников звука до сих

пор является предметом дискуссии. По крайней мере, по азимутальной координате не вызывает сомнения то обстоятельство, что нейроны, избирательно отвечающие на движение источников звука, всегда обладают пространственной избирательностью (Альтман, 2011). Это позволяет утверждать, что если движение обнаруживается слушателем, то одновременно определяется область пространства, в которой оно происходит. Вместе с тем для формирования у слушателя движущегося звукового образа необходимо некоторое время его звучания, т.е. слуховая локализация обладает инерционностью (Блауэрт, 1979). Пороги по длительности при приближении и удалении звукового образа определяли с применением разных моделей движения. В одной из первых работ в этом направлении процедура измерения порога отличалась от общепринятой. Была определена длительность движущегося звукового образа, при которой происходила смена перцептивного критерия (многоальтернативный выбор) и возникало ощущение движения (Вартанян, Черниговская, 1980). Она составила около 400 мс. Моделирование радиального движения выполняли в свободном звуковом поле, для чего предъявляли тональные или шумовые посылки нарастающей или убывающей амплитуды через громкоговоритель под азимутальным углом 0 и 45° относительно средней линии головы испытуемого.

Порог обнаружения движения для модели БУС, измеренный методом постоянных рядов, был равен 140 мс (Altman, Andreeva, 2004). Этот результат с учетом применения разных процедур и критериев при оценке порогов совпадал по ве-

личине с порогами для других координат акустического пространства (Висков, 1975; Blauert, 1972; Grantham, 1986; Middlebrooks, Green, 1991; Perrot et al., 1993; Saberi, Perrot, 1990; Strybel et al., 1989; Strybel et al., 1992). Частичное снижение доли высоких частот в спектре широкополосного сигнала не вызывало ухудшения временной чувствительности к восприятию движения (Гвоздева, Андреева, 2019). В то же время полное исключение высокочастотного бинаурального механизма слуха, выполненное путем удаления из спектра сигнала частот выше 3000 Гц, приводило к увеличению порога восприятия радиального движения почти в 2 раза (Андреева, 2004б). Такое же увеличение порога по длительности было показано при прослушивании под углом 90° (Altman, Andreeva, 2004). В последнем случае возникает максимальное преимущество одного из ушей и бинауральный механизм оказывается неэффективным. Таким образом, моноауральный слуховой анализ движения источников звука согласно представленным данным обладает большей инерционностью, чем бинауральный. Сравнение по данным литературы бинаурального и моноаурального прослушивания движущихся по азимуту звуковых образов также выявило увеличение минимальной длительности стимула для опознания направления движения с 95–140 до 250–350 мс, т.е. примерно в 2–2.5 раза (Strybel et al., 1989). Применение адаптивной методики оценки порогов по длительности позволило оценить индивидуальную вариабельность порогов. Эти пороги варьировали в такой же степени, как и пороги по расстоянию для движущихся источников, минимальные и максимальные значения этого показателя в группе испытуемых с нормальным слухом различались в 3 раза (Andreeva et al., 2020).

Еще одной характеристикой пространственного слуха, определяющей возможность сравнения динамических процессов в окружающей среде, являются дифференциальные пороги по скорости движения. Дифференциальные пороги по скорости приближения были измерены при моделировании движения моноаурально предъявляемыми импульсными последовательностями, амплитуда которых менялась пропорционально квадрату времени (Кожевникова, 1985). Было показано, что при оценке дифференциальных порогов скорости испытуемые могли применять и другие признаки сигнала, такие как длительность или интегральные характеристики (уровень интенсивности \times длительность). После выявления группы испытуемых, которые не использовали указанные выше признаки для определения различий в сигнале, в этой группе были измерены дифференциальные пороги по скорости движения. Полученные пороги оказались высокими — 20–35% от эталонной скорости. Они возрастали с увеличением эталонной скорости. Следует отме-

тить, что повышение порогов наблюдали для сигналов длительностью 0.5 и 4 с. Для промежуточных значений длительности сигнала пороги снижались в 1.5 раза. Таким образом, несмотря на попытки автора “отстроиться” от фактора времени, длительность стимула существенно влияла на полученный результат. Эта попытка измерить дифференциальные пороги для радиального направления движения имела еще одну особенность — полученный результат выражался в дБ/с, и его нельзя было соотнести с реальными скоростями приближающихся источников звука.

Измерение величины дифференциальных порогов проводилось также с применением модели БУС (Огородникова, Пак, 1998). Разнонаправленное и близкое к линейному изменение амплитуды импульсных последовательностей формировало ощущение движения звукового образа от дальнего динамика к ближнему. Применение последовательности коротких импульсов — щелчков — показало, что пороги по скорости составляют около 1% и сопоставимы с порогами по частоте следования щелчков. Замена щелчков на импульсы, длительность которых составляли более половины периода, позволила изменять скорость движения звукового образа независимо от частоты повторения импульсов. Результаты оценки дифференциальных порогов изменились. В диапазоне исследованных эталонных скоростей движения звукового образа от 1 до 8 м/с величина относительного порога по скорости составляла от 2.5 до 7% и имела выраженный минимум при скоростях 3 и 4 м/с (Андреева, Альтман, 2001).

Таким образом, применение различных методов стимуляции с использованием неподвижных и движущихся по радиальной координате реальных источников и звуковых образов позволило получить нормативные данные по оценке удаленности источника звука для здоровых испытуемых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в обзоре материалы, касающиеся как методов исследования, так и результатов психоакустических экспериментов по слуховой оценке расстояния, показывают, что эта область пространственного слуха остается в настоящее время малоизученной, несмотря на ее биологическую и социальную значимость для безопасности (акустический мониторинг окружающего пространства) и речевого взаимодействия при разных коммуникативных дистанциях. Важным аспектом обзора стал анализ основных моноауральных и бинауральных признаков, которые используются слуховой системой человека при пространственной оценке удаленности источника звука или речи, а также ограничений экспериментальных подходов к исследованию способно-

сти локализации по расстоянию, включая современные методы формирования неподвижных и движущихся звуковых образов и виртуальной акустической реальности. При этом потребность в оценке состояния пространственного слуха актуальна и в связи с возможностями современных технологий слухопротезирования, поскольку они позволяют в значительной мере реализовать бионауральные механизмы слуха даже при существенных нарушениях слуховой функции.

В целом обсуждение перспективных экспериментальных и прикладных подходов к изучению локализации по удаленности, в том числе собственных разработок авторов, и всего комплекса полученных с их помощью данных о разрешающей способности слуха по расстоянию, направлено на расширение возможностей исследования пространственного восприятия у человека и развитие технологий виртуальной акустической реальности. Оно будет способствовать обоснованию сравнительной оценки изменений в локализации звука при периферических и центральных нарушениях слуха и повышению эффективности новых способов их компенсации, в частности, в условиях функционального тренинга.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (темы № 075-00967-23-00 и № 0134-2019-0005).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Идея работы и планирование обзора (И.Г. Андреева, Е.А. Огородникова), сбор данных научной литературы, написание и редактирование статьи (И.Г. Андреева, В.М. Ситдииков, Е.А. Огородникова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман Я.А. *Пространственный слух*. СПб.: Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН. 2011. 311 с.
- Андреева И.Г. Виртуальная акустическая реальность: психоакустические исследования. *Сенсорные системы*. 2004а. Т. 18. № 3. С. 251–264.
- Андреева И.Г. Пороговая длительность сигналов при восприятии человеком радиального движения звуковых образов различного спектрального состава. *Сенсорные системы*. 2004б. Т. 18. № 3. С. 233–238.
- Андреева И.Г., Альтман Я.А. О восприятии человеком скорости приближения и удаления звукового образа, движущегося под разными азимутальными углами. *Сенсорные системы*. 2001. Т. 15. № 4. С. 295–300.
- Андреева И.Г., Гвоздева А.П. Пороги непрерывного приближения звуковых источников с ритмическими структурами, характерными для биологически значимых звуковых сигналов. *ЖЭБФ*. 2015. Т. 51. № 1. С. 29–36.
- Андреева И.Г., Бахтина А.В., Гвоздева А.П. Разрешающая способность слуха человека по расстоянию при приближении и удалении источников звука разного спектрального состава. *Сенсорные системы*. 2014. Т. 28. № 4. С. 3–12.
- Андреева И.Г., Гвоздева А.П., Огородникова Е.А. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления источника при моделировании снижения высокочастотного слуха. *Сенсорные системы*. 2018. Т. 32. № 4. С. 277–284. <https://doi.org/10.1134/S0235009218040029>
- Андреева И.Г., Ситдииков В.М., Гвоздева А.П., Огородникова Е.А., Голованова Л.Е., Клишова Е.А. *Способ скрининговой оценки способности человека к различению положения источников звука по расстоянию*. Патент РФ. № 2754342. 2021.
- Блауэрт Й. *Пространственный слух*. М.: Энергия. 1979. 224 с.
- Вартанян И.А., Черниговская Т.В. Влияние различных параметров акустической стимуляции на оценку человеком изменения расстояния от источника звука. *Физиол. журн. СССР*. 1980. Т. 66. № 1. С. 101–108.
- Вартанян И.А., Андреева И.Г., Мазинг А.Ю., Маркович А.М. Оценка восприятия человеком скорости и ускорения приближения и удаления источника звука. *Физиология человека*. 1999. Т. 25. № 5. С. 38–47.
- Висков О.В. О восприятии движения слитного слухового образа. *Физиология человека*. 1975. Т. 1. № 2. С. 371–376.
- Гвоздева А.П., Андреева И.Г. Разрешающая способность слуха человека по расстоянию при локализации приближающихся и удаляющихся непрерывных и прерывистых звуковых образов. *Сенсорные системы*. 2016. Т. 30. № 2. С. 114–153.
- Гвоздева А.П., Андреева И.Г. Метод оценки временных показателей пространственного слуха при сенсоневральной тугоухости 2–3 степени. *Мат. XXXII Сессии Российского Акустического Общества*. М., 2019. С. 113.
- Кожевникова Е.В. Некоторые характеристики восприятия человеком приближающегося звукового образа. *Физиол. журн. СССР*. 1980. Т. 66. № 1. С. 109–112.
- Кожевникова Е.В. Оценка человеком скорости приближения источника звука. *Физиология человека*. 1985. Т. 11. № 3. С. 368–373.
- Кожевникова Е.В. Восприятие приближения и удаления звука шагов. Условия возникновения перцептивного эффекта движения. *Сенсорные системы*. 1989. Т. 3. № 1. С. 93–100.
- Огородникова Е.А., Пак С.П. Различение человеком скорости движения при фронтальном приближе-

- нии источника звука. *Физиология человека*. 1998. Т. 24. № 2. С. 51–55.
- Пак С.П., Огородникова Е.А. Формирование акустических стимулов, моделирующих движение источника звука при его приближении и удалении. *Сенсорные системы*. 1997. Т. 11. № 3. С. 346–351.
- Aggius-Vella E., Gori M., Campus C., Moore B.C.J., Pardhan S., Kolarik A.J., Van der Stoep N. Auditory distance perception in front and rear space. *Hearing Research*. 2022. V. 417. P. 108468. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2022>
- Ahveninen J., Kopčo N., Jääskeläinen I.P. Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans. *Hearing research*. 2014. V. 307. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.07.008>
- Akeroyd M.A., Gatehouse S., Blaschke J. The detection of differences in the cues to distance by elderly hearing-impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 121. № 2. P. 1077–1089. <https://doi.org/10.1121/1.2404927>
- Altman J.A., Andreeva I.G. Monaural perception and binaural perception of approaching and withdrawing auditory images in humans. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43. № 4. P. 227–235. <https://doi.org/10.1080/14992020400050031>
- Andreeva I.G. Spatial Selectivity of Hearing in Speech Recognition in Speech-shaped Noise Environment. *Hum Physiol.* 2018. V. 44. № 2. P. 226–236. <https://doi.org/10.1134/S0362119718020020>
- Andreeva I.G., Dymnikowa M., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A., Pak S.P. Spatial separation benefit for speech detection in multi-talker babble-noise with different egocentric distances. *Acta Acustica united with Acustica*. 2019. V. 105. № 3. P. 484–491. <https://doi.org/10.3813/AAA.919330>
- Andreeva I.G., Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Ogorodnikova E.A. Comparative assessment of spatial and temporal resolutions in the localization of an approaching and receding broadband noise source in healthy subjects and patients with first-degree symmetric sensorineural hearing loss. *Human Physiology*. 2020. V. 46. № 5. P. 465–472. <https://doi.org/10.1134/S0362119720040039>
- Armstrong C., Thresh L., Murphy D., Kearney G.A. Perceptual evaluation of individual and non-individual HRTFs: A case study of the SADIE II database. *Appl. Sci.* 2018. V. 8. P. 2029. <https://doi.org/10.3390/app8112029>
- Ashmead D.H., Leroy D., Odom R.D. Perception of the relative distances of nearby sound sources. *Perception & Psychophysics*. 1990. V. 47. P. 326–331. <https://doi.org/10.3758/BF03210871>
- Begault D.R. Preferred sound intensity increase for sensation of half distance. *Perceptual and motor skills*. 1991. V. 72. № 3. P. 1019–1029. <https://doi.org/10.2466/pms.1991.72.3.1019>
- Begault D.R., Wenzel E.M., Anderson M.R. Direct Comparison of the Impact of Head Tracking, Reverberation, and Individualized Head-Related Transfer Functions on the Spatial Perception of a Virtual Speech Source. *J. Audio Eng. Soc.* 2001. V. 49. P. 904–916.
- Bertelson P., Radeau M. Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Percept. Psychophys.* 1981. V. 29. P. 578–584. <https://doi.org/10.3758/bf03207374>
- Best V., Baumgartner R., Lavandier M., Majdak P., Kopčo N. Sound Externalization: A Review of Recent Research. *Trends in Hearing*. 2020. V. 24. <https://doi.org/10.1177/2331216520948390>
- Blauert J. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge. MIT Press, 1997. 494 p.
- Bronkhorst A.W. The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2015. V. 77. № 5. P. 1465–1487. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Brungart D.S., Rabinowitz W.M., Durlach N.I. Auditory localization of a nearby point source. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 100. P. 2593. <https://doi.org/10.1121/1.417577>
- Brungart D.S., Rabinowitz W.M. Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1465–1479. <https://doi.org/10.1121/1.427180>
- Butler R.A., Levy E.T., Neff W.D. Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1980. V. 6. № 4. P. 745. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.6.4.745>
- Calamia P.T., Hixson E.L. Measurement of the head-related transfer function at close range. *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 102. P. 3117. <https://doi.org/10.1121/1.420569>
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in hearing*. 2016. V. 20. P. 2331216516644254. <https://doi.org/10.1177/2331216516644254>
- Catic J., Santurette S., Buchholz J.M., Gran F., Dau T. The effect of interaural-level-difference fluctuations on the externalization of sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. V. 134. № 2. P. 1232–1241. <https://doi.org/10.1121/1.4812264>
- Chabot-Leclerc A., MacDonald E.N., Dau T. Predicting binaural speech intelligibility using the signal-to-noise ratio in the envelope power spectrum domain. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. V. 140. № 1. P. 192–205.
- Cochran P., Throop J., Simpson W.E. Estimation of distance of a source of sound. *The American journal of psychology*. 1968. V. 81. № 2. P. 198–206. <https://doi.org/10.2307/1421264>
- Coleman P.D. Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound. *J. Acoust. Soc. Am.* 1962. V. 34. P. 345–346.
- Coleman P.D. An analysis of cues to auditory depth perception in free space. *Psychological Bulletin*. 1963. V. 60. № 3. P. 302–315. <https://doi.org/10.1037/h0045716>
- Coudert A., Verdelet G., Reilly K.T., Truy E., Gaveau V. Intensive Training of Spatial Hearing Promotes Auditory Abilities of Bilateral Cochlear Implant Adults: A Pilot Study. *Ear and Hearing*. 2022. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001256>

- Duda R.O., Martens W.L. Range dependence of the response of a spherical head model. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 104. № 5. P. 3048–3058.
<https://doi.org/10.1121/1.423886>
- Edwards A.S. Accuracy of auditory depth perception. *Journal of General Psychology.* 1955. V. 52. P. 327–329.
<https://doi.org/10.1080/00221309.1955.9920247>
- Fontana F., Rocchesso D. Auditory distance perception in an acoustic pipe. *ACM Transactions on Applied Perception.* 2008. V. 5. № 3. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1145/1402236.1402240>
- Gardner M.B. Distance Estimation of 0° or Apparent 0° – Oriented Speech Signals in Anechoic Space. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 45. № 1. P. 47–53.
<https://doi.org/10.1121/1.1911372>
- Gordon M.S., Russo F.A., MacDonald E. Spectral information for detection of acoustic time to arrival. *Attention Perception & Psychophysics.* 2013. V. 75. № 4. P. 738–750.
<https://doi.org/10.3758/s13414-013-0424-2>
- Grantham D.W. Detection and discrimination of simulated motion of auditory targets in the horizontal plane. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1986. V. 79. № 6. P. 1939–1949.
<https://doi.org/10.1121/1.393201>
- Guo Z., Lu Y., Wang L., Yu G. Discrimination experiment of sound distance perception for a real source in near-field. *EAA Spatial Audio Signal Processing Symposium.* 2019. P. 85–89.
<https://doi.org/10.25836/sasp.2019.25>
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. The Minimum Audible Movement Distance for Localization of Approaching and Receding Broadband Noise with a Reduced Fraction of High-Frequency Spectral Components Typical of Prebycusis. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology.* 2019. V. 55. № 6. P. 463–474.
<https://doi.org/10.1134/S0022093019060048>
- Hall D.A., Moore D.R. Auditory neuroscience: The salience of looming sounds. *Current Biology.* 2003. V. 13. № 3. P. R91–R93.
[https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00034-4)
- Hartley R.V.L., Fry T.C. The Binaural Location of Pure Tones. *Physical Review.* 1921. V. 18. № 6. P. 431.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.18.431>
- Hartmann W.M., Wittenberg A. On the externalization of sound images. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. № 6. P. 3678–3688.
<https://doi.org/10.1121/1.414965>
- Haustein B.G. Hypothesen über die einohrige Entfernungswahrnehmung des menschlichen Gehörs (Hypothesen about the perception of distance in human hearing with one ear). *Hochfrequenztech. u. Elektroakustik.* 1969. V. 78. P. 46–57.
- Hirsch R.H. Perception of the range of a sound source of unknown strength. *J. Acoust. Soc. Am.* 1968. V. 43. P. 373–374.
<https://doi.org/10.1121/1.1910789>
- Holt R.E., Thurlow W.R. Subject orientation and judgment of distance of a sound source. *Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46. № 6B. P. 1584–1585.
<https://doi.org/10.1121/1.1911909>
- Jenny C., Reuter C. Usability of individualized head-related transfer functions in virtual reality: Empirical study with perceptual attributes in sagittal plane sound localization. *JMIR Serious Games.* 2020. V. 8. P. e17576.
<https://doi.org/10.2196/17576>
- Kearney G., Gorzel M., Rice H., Boland F. Distance perception in interactive virtual acoustic environments using first and higher order ambisonic sound fields. *Acta Acustica united with Acustica.* 2012. V. 98. P. 61–71.
<https://doi.org/10.3813/AAA.918492>
- Kim H-Y., Suzuki Y., Takane S., Sone T. Control of auditory distance perception based on the auditory parallax model. *Applied Acoustics.* 2001. V. 62. Is. 3. P. 245–270.
[https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00023-2)
- Kolarik A.J., Moore B.C.J., Zahorik P., Cirstea S., Pardhan S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys.* 2016. V. 78. № 2. P. 373–395.
<https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1>
- Kolarik A.J., Raman R., Moore B.C.J., Cirstea S., Gopalakrishnan S., Pardhan S. The accuracy of auditory spatial judgments in the visually impaired is dependent on sound source distance. *Scientific Reports.* 2020. V. 10. P. 7169.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-64306-8>
- Kopčo N., Shinn-Cunningham B.G. Spatial unmasking of nearby pure-tone targets in a simulated anechoic environment. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 2003. V. 114. № 5. P. 2856–2870.
<https://doi.org/10.1121/1.1616577>
- Kopčo N., Shinn-Cunningham B.G. Effect of stimulus spectrum on distance perception for nearby sources. *Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130. № 3. P. 1530–1541
<https://doi.org/10.1121/1.3613705>
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. In: *Neural Networks and Neurotechnologies* (eds: Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova). SPb, Publish by VVM, 2019. P. 231–249.
- Lambert R.M. Dynamic theory of sound-source localization. *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. P. 165–171.
<https://doi.org/10.1121/1.1903248>
- Liu Y., Xie B.S. Auditory discrimination on the distance dependence of near-field head-related transfer function magnitudes. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2013. V. 19. P. 050048.
<https://doi.org/10.1121/1.4799196>
- Lounsbury B.F., Butler R.A. Estimation of distances of recorded sounds presented through headphones. *Scandinavian audiology.* 1979. V. 8. № 3. P. 145–149.
<https://doi.org/10.3109/01050397909076315>
- Lundbeck M., Grimm G., Hohmann V., Laugesen S., Nether T. Sensitivity to angular and radial source movements as a function of acoustic complexity in normal and impaired hearing. *Trends in hearing.* 2017. V. 21. P. 2331216517717152.
<https://doi.org/10.1177/2331216517717152>
- Marrone N., Mason C.R., Kidd Jr.G. The effects of hearing loss and age on the benefit of spatial separation between multiple talkers in reverberant rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 2008. V. 124. № 5.

- P. 3064–3075.
<https://doi.org/10.1121/1.2980441>
- McAnally K.I., Martin R.L. Sound localization with head movement: Implications for 3-d audio displays. *Front. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 1–6.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00210>
- Mershon D.H., Bowers J.N. Absolute and relative cues for the auditory perception of egocentric distance. *Perception*. 1979. V. 8. № 3. P. 311–322.
<https://doi.org/10.1068/p080311>
- Mershon D.H., King L.E. Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception & Psychophysics*. 1975. V. 18. № 6. P. 409–415.
<https://doi.org/10.3758/BF03204113>
- Mershon D.H., Ballenger W.L., Little A.D., McMurtry P.L., Buchanan J.L. Effects of room reflectance and background noise on perceived auditory distance. *Perception*. 1989. V. 18. № 3. P. 403–416.
<https://doi.org/10.1068/p180403>
- Middlebrooks J.C. Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1493–1510
<https://doi.org/10.1121/1.427147>
- Middlebrooks J.C. Sound localization. *Handbook of clinical neurology*. 2015. V. 129. P. 99–116.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00006-8>
- Middlebrooks J.C., Green D.M. Sound localization by human listeners. *Annual review of psychology*. 1991. V. 42. № 1. P. 135–159.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ps.42.020191.001031>
- Molino J. Perceiving the Range of a Sound Source When the Direction is Known. *J. Acoust. Soc. Am.* 1973. V. 53. P. 1301–1304.
<https://doi.org/10.1121/1.1913469>
- Møller H., Sørensen M.F., Hammershøi D., Jensen C.B. Head-Related Transfer Functions of Human Subjects. *J. Audio Eng. Soc.* 1995. V. 43. P. 300–321.
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Moore D.R., King A.J. Auditory perception: The near and far of sound localization. *Current Biology*. 1999. V. 9. № 10. P. R361–R363.
[https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(99\)80227-9](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(99)80227-9)
- Naguib M., Wiley R.H. Estimating the distance to a source of sound: mechanisms and adaptations for long-range communication. *Animal behavior*. 2001. V. 62. № 5. P. 825–837.
<https://doi.org/10.1006/anbe.2001.1860>
- Neuhoff J.G. Perceptual bias for rising tones. *Nature*. 1998. V. 395. № 6698. P. 123–124.
<https://doi.org/10.1038/25862>
- Oberem J., Richter J.G., Setzer D., Seibold J., Koch I., Fels J. Experiments on localization accuracy with non-individual and individual HRTFs comparing static and dynamic reproduction methods. *bioRxiv*. 2020. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1101/2020.03.31.011650>
- Otani M., Hirahara T., Ise S. Numerical study on source-distance dependency of head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2009. V. 125. № 5. P. 3253–3261.
<https://doi.org/10.1121/1.3111860>
- Parseihian G., Jouffrais C., Katz B.F. Reaching nearby sources: Comparison between real and virtual sound and visual targets. *Frontiers in Neuroscience*. 2014. V. 8. P. 269.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00269>
- Pelzer R., Dinakaran M., Brinkmann F., Lepa, S., Grosche P., Weinzierl S. Head-related transfer function recommendation based on perceptual similarities and anthropometric features. *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 148. P. 3809–3817
<https://doi.org/10.1121/10.0002884>
- Perrott D.R., Ambarsoom H., Tucker J. Changes in head position as a measure of auditory localization performance: Auditory psychomotor coordination under monaural and binaural listening conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. V. 82. № 5. P. 1637.
<https://doi.org/10.1121/1.395155>
- Perrott D.R., Costantino B., Cisneros J. Auditory and visual localization performance in a sequential discrimination task. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. V. 93. № 4. P. 2134–2138.
<https://doi.org/10.1121/1.406675>
- Petersen J. Estimation of loudness and apparent distance of pure tones in a free field. *Acta Acustica united with Acustica*. 1990. V. 70. № 1. P. 61–65.
- Risoud M., Hanson J.N., Gauvrit F., Renard C., Lemesre P.E., Bonne N.X., Vincent C. Sound source localization. *European annals of otorhinolaryngology, head and neck diseases*. 2018. V. 135. № 4. P. 259–264.
<https://doi.org/10.1016/j.anorl.2018.04.009>
- Rosenblum L.D., Carello C., Pastore R.E. Relative effectiveness of three stimulus variables for locating a moving sound source. *Perception*. 1987. V. 16. № 2. P. 175–186.
<https://doi.org/10.1068/p160175>
- Rummukainen O.S., Robotham T., Habets E.A. Head-Related Transfer Functions for Dynamic Listeners in Virtual Reality. *Applied Sciences*. 2021. V. 11. № 14. P. 6646.
<https://doi.org/10.3390/app11146646>
- Russell M.K. Age and Auditory Spatial Perception in Humans: Review of Behavioral Findings and Suggestions for Future Research. *Front. Psychol.* 2022. V. 13. P. 831670.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.831670>
- Saberi K., Perrott D.R. Lateralization thresholds obtained under conditions in which the precedence effect is assumed to operate. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1990. V. 87. P. 1732–1737.
<https://doi.org/10.1121/1.399422>
- Seifritz E., Neuhoff J.G., Bilecen D., Scheffler K., Mustovic H. Neural processing of auditory looming in the human brain. *Current Biology*. 2002. V. 12. P. 2147–2151.
[https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(02\)01356-8](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(02)01356-8)
- Shinn-Cunningham B.G., Santarelli S., Kopco N. Tori of confusion: Binaural localization cues for sources within reach of a listener. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000. V. 107. № 3. P. 1627–1636.
<https://doi.org/10.1121/1.428447>

- Shinn-Cunningham B.G., Streeter T., Gyss J.F. Perceptual plasticity in spatial auditory displays. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*. 2005. V. 2. № 4. P. 418–425.
<https://doi.org/10.1145/1101530.1101536>
- Simpson W.E., Stanton L.D. Head movement does not facilitate perception of the distance of a source of sound. *The American journal of psychology*. 1973. V. 86. № 1. P. 151–159.
<https://doi.org/10.2307/1421856>
- Stevens S.S., Guirao M. Loudness, reciprocity, and partition scales. *Acoust. Soc. Am.* 1962. V. 34. № 9B. P. 1466–1471.
<https://doi.org/10.1121/1.1918370>
- Strybel T.Z., Perrott D.R. Discrimination of relative distance in the auditory modality: The success and failure of the loudness discrimination hypothesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 1984. V. 76. № 1. P. 318–320.
<https://doi.org/10.1121/1.391064>
- Strybel T.Z., Manligas C.L., Perrott D.R. Auditory apparent motion under binaural and monaural listening conditions. *Perception & Psychophysics*. 1989. V. 45. № 4. P. 371–377.
<https://doi.org/10.3758/BF03204951>
- Strybel T.Z., Manligas C.L., Chan O., Perrott D.R. A comparison of the effects of spatial separation on apparent motion in the auditory and visual modalities. *Perception & Psychophysics*. 1990. V. 47. № 5. P. 439–448.
<https://doi.org/10.3758/BF03208177>
- Strybel T.Z., Manligas C.L., Perrott D.R. Minimum audible movement angle as a function of the azimuth and elevation of the source. *Human factors*. 1992. V. 34. № 3. P. 267–275.
<https://doi.org/10.1177/001872089203400302>
- Vartanyan I.A., Andreeva I.G. A psychophysiological study of auditory illusions of approach and withdrawal in the context of the perceptual environment. *The Spanish journal of psychology*. 2007. V. 10. № 2. P. 266–276.
<https://doi.org/10.1017/S1138741600006533>
- von Békésy G. The moon illusion and similar auditory phenomena. *The American journal of psychology*. 1949. V. 62. № 4. P. 540–552.
<https://doi.org/10.2307/1418558>
- Warren R.M. *Auditory perception: A new analysis and synthesis*. Cambridge, UK. Cambridge University Press, 1999. 241 p.
- Wenzel E.M., Arruda M., Kistler D.J., Wightman F.L. Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *J Acoust Soc Am.* 1993. V. 94. P. 111–23.
<https://doi.org/10.1121/1.407089>
- Westermann A., Buchholz J.M. Release from masking through spatial separation in distance in hearing impaired listeners. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013. Acoustical Society of America*. 2013. V. 19. № 1. P. 050156.
<https://doi.org/10.1121/1.4906581>
- Wightman E.R., Firestone F.A. Binaural localization of pure tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1930. V. 2. № 2. P. 271–280.
<https://doi.org/10.1121/1.1915255>
- Yu G., Wang L. Effect of Individualized Head-Related Transfer Functions on Distance Perception in Virtual Reproduction for a Nearby Sound Source. *Archives of Acoustics*. 2019. V. 44. № 2. P. 251–258.
<https://doi.org/10.24425/aoa.2019.128488>
- Zahorik P. Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 2002. V. 111. P. 1832–1846.
<https://doi.org/10.1121/1.1458027>
- Zahorik P., Wightman F.L. Loudness constancy with varying sound source distance. *Nature Neuroscience*. 2001. V. 4. P. 78–83.
<https://doi.org/10.1038/82931>
- Zahorik P., Brungart D.S., Bronkhorst A.W. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica*. 2005. V. 91. № 3. P. 409–420.
- Zhang M., Qiao Y., Wu X., Qu T. Distance-dependent Modeling of Head-related Transfer Functions. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2019. P. 276–280.
<https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683756>
- Zhong X.L., Xie B.S. Head-related transfer functions and virtual auditory display. In: *Soundscape Semiotics-Localization and Categorization*. 2014.
<https://doi.org/10.5772/56907>

Experimental methods to study the sound source localization by distance in humans

I. G. Andreeva^{a,#}, V. M. Sitdikov^a, and E. A. Ogorodnikova^b

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of Russian Academy of Sciences
194223 Saint Petersburg, pr. Torez, 44, Russia*

^b*Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences
199034 Saint Petersburg, Makarov emb., 6, Russia*

[#]*E-mail: ig-andreeva@mail.ru*

The review presents current methods used for researches of the auditory distance perception. The monaural and binaural cues of stationary and moving sources localization are considered. The role of binaural hearing in estimating the distance to a sound source is discussed in detail. The involvement of localization cues in absolute and relative distance estimation is described. The advantages and limitations of different experimental practices for forming virtual sound images are discussed. The special section discusses approaches to the creation of moving sound images. The results of auditory distance estimations obtained by different methods for stationary and moving sound sources are summarized. The review includes the results of the authors' own studies and a description of promising experimental and applied approaches of this research field.

Key words: spatial hearing, binaural hearing, acoustical virtual reality, minimal audible distance, auditory egocentric distance, motion perception

REFERENCES

- Altman J.A. *Prostranstvennyi slukh* [Spatial hearing]. Sankt-Petersburg: Institut fiziologii im. I.P. Pavlova RAN, 2011. 311 p. (in Russian).
- Andreeva I.G. *Virtual'naya akusticheskaya real'nost': psikoakusticheskie issledovaniya* [Virtual Acoustical Reality: Psychoacoustical Studies]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2004a. 18 (3). P. 251–264 (in Russian).
- Andreeva I.G. *Porogovaya dlitel'nost' signalov pri vospriyatii chelovekom radial'nogo dvizheniya zvukovykh obrazov razlichnogo spektral'nogo sostava* [Threshold duration of signal in human perception of radial motion of sound image with different spectral bands]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2004b. V. 18 (3). P. 233–238 (in Russian).
- Andreeva I.G., Altman J.A. *O vospriyatii chelovekom skorosti priblizheniya i udaleniya zvukovogo obraza, dvizhushchegosya pod raznymi azimutal'nymi uglami* [On human perception of the speed of approach and removal of a sound image moving at different azimuth angles]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2001. V. 15 (4). P. 295–300 (in Russian).
- Andreeva I.G., Gvozdeva A.P. *Porogi nepreryvnogo priblizheniya zvukovykh istochnikov s ritmicheskimi strukturami, kharakternymi dlya biologicheskoi znachimykh zvukovykh signalov* [Perception thresholds of continuously approaching sound sources with rhythmic structures specific to biologically significant signals]. *Zhurnal evolyutsionnoi biokhimmii i fiziologii* [Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology]. 2015. V. 51 (1). P. 29–36 (in Russian).
- Andreeva I.G., Bakhtina A.V., Gvozdeva A.P. *Razreshayushchaya sposobnost' slukha cheloveka po rasstoyaniyu pri priblizhenii i udaleni istochnikov zvuka raznogo spektral'nogo sostava* [Human's hearing resolution in case of localizing of approaching and withdrawing sound images with various spectral structures]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2014. V. 28 (4). P. 3–12 (in Russian).
- Andreeva I.G., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A. *Porogovaya dlitel'nost' zvukovykh signalov dlya otsenki priblizheniya i udaleniya ikh istochnika pri modelirovanii snizheniya vysokochastotnogo slukha* [Threshold duration of sound signals for their sources approaching and withdrawing under condition of high-frequency hearing loss modeling]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2018. V. 32 (4). P. 277–284 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0235009218040029>
- Andreeva I.G., Sitdikov V.M., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A., Golovanova L.E., Klishova E.A. *Sposob skriningovoi otsenki sposobnosti cheloveka k razlicheniyu polozheniya istochnikov zvuka po rasstoyaniyu* [Method for screening assessment of a person's ability to distinguish between the position of sound sources by distance]. Patent RF. № 2754342. 2021 (in Russian).
- Blauert I. *Prostranstvennyi slukh* [Spatial hearing]. Moscow: Energiya. 1979. 224 p. (in Russian).
- Vartanyan I.A., Chernigovskaya T.V. *Vliyanie razlichnykh parametrov akusticheskoi stimulyatsii na otsenku chelovekom izmeneniya rasstoyaniya ot istochnika zvuka* [Influence of various parameters of acoustic stimulation on human assessment of changes in distance from the sound source]. *Fiziologicheskii zhurnal SSSR* [Physiological Journal of the USSR]. 1980. V. 66 (1). P. 101–108 (in Russian).
- Vartanyan I.A., Andreeva I.G., Mazing A.Yu., Markovich A.M. *Otsenka vospriyatii chelovekom skorosti i uskoreniya priblizheniya i udaleniya istochnika zvuka* [Assessment of human perception of the speed and acceleration of the approach and removal of the sound source]. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. 1999. V. 25 (5). P. 38–47 (in Russian).
- Viskov O.V. *O vospriyatii dvizheniya slitnogo slukhovogo obraza*. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. 1975. V. 1 (2). P. 371–376 (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. *Razreshayushchaya sposobnost' slukha cheloveka po rasstoyaniyu pri lokalizatsii priblizhayushchikhsya i udalyayushchikhsya nepreryvnykh i preryvistykh zvukovykh obrazov* [Spatial resolution of human auditory system in case of localization of approaching and withdrawing continuous and broken sound images]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2016. V. 30 (2). P. 114–153 (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. *Metod otsenki vremennykh pokazatelei prostranstvennogo slukha pri senseveral'noi tugoukhosti 2–3 stepeni* [Method for assessing temporal indicators of spatial hearing in sensorineural hearing loss of 2–3 degrees]. *Mat. XXXII Sessii Rossiiskogo Akusticheskogo Obshchestva* [Proceedings of the XXXII Session of the Russian Acoustical Society]. Moscow, 2019. P. 113 (in Russian).
- Kozhevnikova E.V. *Nekotorye kharakteristiki vospriyatii chelovekom priblizhayushchegosya zvukovogo obraza* [Some characteristics of human perception of an approaching sound image]. *Fiziologicheskii zhurnal SSSR* [Physiological Journal of the USSR]. 1980. V. 66 (1). P. 109–112 (in Russian).
- Kozhevnikova E.V. *Otsenka chelovekom skorosti priblizheniya istochnika zvuka* [Human estimate of the speed of approach of the sound source]. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. 1985. V. 11 (3). P. 368–373 (in Russian).
- Kozhevnikova E.V. *Vospriyatie priblizheniya i udaleniya zvuka shagov. Usloviya vozniknoveniya pertseptivnogo effekta dvizheniya* [Perception of the approach and removal of the sound of footsteps. Conditions for the occurrence of the perceptual effect of movement]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 1989. V. 3 (1). P. 93–100 (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Pak S.P. *Razlichenie chelovekom skorosti dvizheniya pri frontal'nom priblizhenii istochnika zvuka* [Distinguishing by a person the speed of movement when the sound source is approached frontally]. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. 1998. V. 24 (2). P. 51–55 (in Russian).
- Pak S.P., Ogorodnikova E.A. *Formirovanie akusticheskikh stimulov, modeliruyushchikh dvizhenie istochnika zvuka pri ego priblizhenii i udaleni* [Formation of acoustic stimuli modeling the movement of the sound source approaching and receding]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 1997. V. 11 (3). P. 346–351 (in Russian).
- Aggius-Vella E., Gori M., Campus C., Moore B.C.J., Pardhan S., Kolarik A.J., Van der Stoep N. *Auditory distance perception in front and rear space*. *Hearing Research*. 2022. V. 417: 108468. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2022>

- Ahveninen J., Kopčo N., Jääskeläinen I.P. Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans. *Hearing research*. 2014. V. 307. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.07.008>
- Akeroyd M.A. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014. 18: 2331216514560442. <https://doi.org/10.1177/2331216514560442>
- Akeroyd M.A., Gatehouse S., Blaschke J. The detection of differences in the cues to distance by elderly hearing-impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 121. N 2. P. 1077–1089. <https://doi.org/10.1121/1.2404927>
- Altman J.A., Andreeva I.G. Monaural perception and binaural perception of approaching and withdrawing auditory images in humans. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43. N 4. P. 227–235. <https://doi.org/10.1080/14992020400050031>
- Andreeva I.G. Spatial Selectivity of Hearing in Speech Recognition in Speech-shaped Noise Environment. *Hum Physiol.* 2018. V. 44. N 2. P. 226–236. <https://doi.org/10.1134/S0362119718020020>
- Andreeva I.G., Dymnikova M., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A., Pak S.P. Spatial separation benefit for speech detection in multi-talker babble-noise with different egocentric distances. *Acta Acustica united with Acustica*. 2019. V. 105. N. 3. P. 484–491. <https://doi.org/10.3813/AAA.919330>
- Andreeva I.G., Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Ogorodnikova E.A. Comparative assessment of spatial and temporal resolutions in the localization of an approaching and receding broadband noise source in healthy subjects and patients with first-degree symmetric sensorineural hearing loss. *Human Physiology*. 2020. V. 46. N. 5. P. 465–472. <https://doi.org/10.1134/S0362119720040039>
- Armstrong C., Thresh L., Murphy D., Kearney G. A. Perceptual evaluation of individual and non-individual HRTFs: A case study of the SADIE II database. *Appl. Sci.* 2018. V. 8. P. 2029. <https://doi.org/10.3390/app8112029>
- Ashmead D.H., Leroy D., Odom R.D. Perception of the relative distances of nearby sound sources. *Perception & Psychophysics*. 1990. V. 47. P. 326–331. <https://doi.org/10.3758/BF03210871>
- Begault D.R. Preferred sound intensity increase for sensation of half distance. *Perceptual and motor skills*. 1991. 72 (3), 1019–1029. <https://doi.org/10.2466/pms.1991.72.3.1019>
- Begault D.R., Wenzel E.M., Anderson M.R. Direct Comparison of the Impact of Head Tracking, Reverberation, and Individualized Head-Related Transfer Functions on the Spatial Perception of a Virtual Speech Source. *J. Audio Eng. Soc.* 2001. V. 49. P. 904–916.
- Bertelson P., Radeau M. Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Percept. Psychophys.* 1981. V. 29. P. 578–584. <https://doi.org/10.3758/bf03207374>
- Best V., Baumgartner R., Lavandier M., Majdak P., Kopčo N. Sound Externalization: A Review of Recent Research. *Trends in Hearing*. 2020. V. 24. <https://doi.org/10.1177/2331216520948390>
- Blauert J. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge. MIT Press, 1997. 494 pp.
- Bronkhorst A.W. The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2015. V. 77 (5). P. 1465–1487. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Brungart D.S., Rabinowitz W.M., Durlach N.I. Auditory localization of a nearby point source. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 100. P. 2593. <https://doi.org/10.1121/1.417577>
- Brungart D.S., Rabinowitz W.M. Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1465–1479. <https://doi.org/10.1121/1.427180>
- Butler R.A., Levy E.T., Neff W.D. Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1980. V. 6 (4). P. 745. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.6.4.745>
- Calamia P.T., Hixson E.L. Measurement of the head-related transfer function at close range. *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 102. P. 3117. <https://doi.org/10.1121/1.420569>
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in hearing*. 2016. 20: 2331216516644254. <https://doi.org/10.1177/2331216516644254>
- Catic J., Santurette S., Buchholz J.M., Gran F., Dau T. The effect of interaural-level-difference fluctuations on the externalization of sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. 134 (2): 1232–1241. <https://doi.org/10.1121/1.4812264>
- Chabot-Leclerc A., MacDonald E.N., Dau T. Predicting binaural speech intelligibility using the signal-to-noise ratio in the envelope power spectrum domain. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. 140 (1), 192–205.
- Cochran P., Throop J., Simpson W.E. Estimation of distance of a source of sound. *The American journal of psychology*. 1968. V. 81 (2). P. 198–206. <https://doi.org/10.2307/1421264>
- Coleman P.D. Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound. *J. Acoust. Soc. Am.* 1962. V. 34. P. 345–346.
- Coleman P.D. An analysis of cues to auditory depth perception in free space. *Psychological Bulletin*. 1963. V. 60 (3). P. 302–315. <https://doi.org/10.1037/h0045716>
- Coudert A., Verdelet G., Reilly K.T., Truy E., Gaveau V. Intensive Training of Spatial Hearing Promotes Auditory Abilities of Bilateral Cochlear Implant Adults: A Pilot Study. *Ear and Hearing*. 2022. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001256>
- Duda R.O., Martens W.L. Range dependence of the response of a spherical head model. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 104 (5). P. 3048–3058. <https://doi.org/10.1121/1.423886>
- Edwards A.S. Accuracy of auditory depth perception. *Journal of General Psychology*. 1955. V. 52. P. 327–329. <https://doi.org/10.1080/00221309.1955.9920247>

- Fontana F., Rocchesso D. Auditory distance perception in an acoustic pipe. *ACM Transactions on Applied Perception*. 2008. V. 5 (3). P. 1–15. <https://doi.org/10.1145/1402236.1402240>
- Gardner M.B. Distance Estimation of 0° or Apparent 0°–Oriented Speech Signals in Anechoic Space. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 45 (1). P. 47–53. <https://doi.org/10.1121/1.1911372>
- Gordon M.S., Russo F.A., MacDonald E. Spectral information for detection of acoustic time to arrival. *Attention Perception & Psychophysics*. 2013. V. 75 (4). P. 738–750. <https://doi.org/10.3758/s13414-013-0424-2>
- Grantham D.W. Detection and discrimination of simulated motion of auditory targets in the horizontal plane. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1986. 79 (6): 1939–1949. <https://doi.org/10.1121/1.393201>
- Guo Z., Lu Y., Wang L., Yu G. Discrimination experiment of sound distance perception for a real source in near-field. *EAA Spatial Audio Signal Processing Symposium*. 2019. P. 85–89. <https://doi.org/10.25836/sasp.2019.25>
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. The Minimum Audible Movement Distance for Localization of Approaching and Receding Broadband Noise with a Reduced Fraction of High-Frequency Spectral Components Typical of Prebycusis. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2019. V. 55 (6). P. 463–474. DOI:10.1134/S0022093019060048
- Hall D.A., Moore D.R. Auditory neuroscience: The salience of looming sounds. *Current Biology*, 2003. 13 (3), R91–R93. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00034-4)
- Hartley R.V.L., Fry T.C. The Binaural Location of Pure Tones. *Physical Review*. 1921. 18 (6), 431. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.18.431>
- Hartmann W.M., Wittenberg A. On the externalization of sound images. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99 (6). P. 3678–3688. <https://doi.org/10.1121/1.414965>
- Haustein B.G. Hypothesen über die einohrige Entfernungswahrnehmung des menschlichen Gehörs (Hypothesen about the perception of distance in human hearing with one ear). *Hochfrequenztech. u. Elektroakustik*. 1969. 78: 46–57.
- Hirsch R.H. Perception of the range of a sound source of unknown strength. *J. Acoust. Soc. Am.* 1968. V. 43. P. 373–374. <https://doi.org/10.1121/1.1910789>
- Holt R.E., Thurlow W.R. Subject orientation and judgment of distance of a sound source. *Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46 (6B). P. 1584–1585. <https://doi.org/10.1121/1.1911909>
- Jenny C., Reuter C. Usability of individualized head-related transfer functions in virtual reality: Empirical study with perceptual attributes in sagittal plane sound localization. *JMIR Serious Games*. 2020. V. 8: e17576. <https://doi.org/10.2196/17576>
- Kearney G., Gorzel M., Rice H., Boland F. Distance perception in interactive virtual acoustic environments using first and higher order ambisonic sound fields. *Acta Acustica united with Acustica*. 2012. V. 98. P. 61–71. <https://doi.org/10.3813/AAA.918492>
- Kim H.-Y., Suzuki Y., Takane S., Sone T. Control of auditory distance perception based on the auditory parallax model. *Applied Acoustics*. 2001. V. 62. Is. 3. P. 245–270. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00023-2)
- Kolarik A.J., Moore B.C.J., Zahorik P., Cirstea S., Pardhan S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys.* 2016. V. 78 (2). P. 373–395. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1>
- Kolarik A.J., Raman R., Moore B.C.J., Cirstea S., Gopalakrishnan S., Pardhan S. The accuracy of auditory spatial judgments in the visually impaired is dependent on sound source distance. *Scientific Reports*. 2020. V. 10. P. 7169. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64306-8>
- Kopčo N., Shinn-Cunningham B.G. Spatial unmasking of nearby pure-tone targets in a simulated anechoic environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2003. 114 (5), 2856–2870. <https://doi.org/10.1121/1.1616577>
- Kopčo N., Shinn-Cunningham B.G. Effect of stimulus spectrum on distance perception for nearby sources. *Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130 (3). P. 1530–1541. <https://doi.org/10.1121/1.3613705>
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. In: *Neural Networks and Neurotechnologies* (eds: Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova). SPb, Publish by VVM, 2019. P. 231–249.
- Lambert R.M. Dynamic theory of sound-source localization. *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. P. 165–171. <https://doi.org/10.1121/1.1903248>
- Liu Y., Xie B.S. Auditory discrimination on the distance dependence of near-field head-related transfer function magnitudes. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2013. 19: 050048. <https://doi.org/10.1121/1.4799196>
- Lounsbury B.F., Butler R.A. Estimation of distances of recorded sounds presented through headphones. *Scandinavian audiology*. 1979. 8 (3). 145–149. <https://doi.org/10.3109/01050397909076315>
- Lundbeck M., Grimm G., Hohmann V., Laugesen S., Nehler T. Sensitivity to angular and radial source movements as a function of acoustic complexity in normal and impaired hearing. *Trends in hearing*. 2017. 21: 2331216517717152. <https://doi.org/10.1177/2331216517717152>
- Marrone N., Mason C.R., Kidd Jr.G. The effects of hearing loss and age on the benefit of spatial separation between multiple talkers in reverberant rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2008. 124 (5): 3064–3075. <https://doi.org/10.1121/1.2980441>
- McAnally K.I., Martin R.L. Sound localization with head movement: Implications for 3-d audio displays. *Front. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 1–6. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00210>
- Mershon D.H., Bowers J.N. Absolute and relative cues for the auditory perception of egocentric distance. *Perception*. 1979. V. 8 (3). P. 311–322. <https://doi.org/10.1068/p080311>
- Mershon D.H., King L.E. Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception & Psychophysics*. 1975. V. 18 (6). P. 409–415. <https://doi.org/10.3758/BF03204113>

- Mershon D.H., Ballenger W.L., Little A.D., McMurtry P.L., Buchanan J.L. Effects of room reflectance and background noise on perceived auditory distance. *Perception*. 1989. 18 (3): 403–416. <https://doi.org/10.1068/p180403>
- Middlebrooks J.C. Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. P. 1493–1510. <https://doi.org/10.1121/1.427147>
- Middlebrooks J.C. Sound localization. *Handbook of clinical neurology*. 2015. 129: 99–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00006-8>
- Middlebrooks J.C., Green D.M. Sound localization by human listeners. *Annual review of psychology*. 1991. 42 (1): 135–159. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.42.020191.001031>
- Molino J. Perceiving the Range of a Sound Source When the Direction is Known. *J. Acoust. Soc. Am.* 1973. V. 53. P. 1301–1304. <https://doi.org/10.1121/1.1913469>
- Møller H., Sørensen M.F., Hammershøi D., Jensen C.B. Head-Related Transfer Functions of Human Subjects. *J. Audio Eng. Soc.* 1995. V. 43. P. 300–321.
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Moore D.R., King A.J. Auditory perception: The near and far of sound localization. *Current Biology*. 1999. V. 9(10), P. R361–R363. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(99\)80227-9](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(99)80227-9)
- Naguib M., Wiley R.H. Estimating the distance to a source of sound: mechanisms and adaptations for long-range communication. *Animal behavior*. 2001. 62 (5), 825–837. <https://doi.org/10.1006/anbe.2001.1860>
- Neuhoff J.G. Perceptual bias for rising tones. *Nature*. 1998. 395 (6698): 123–124. <https://doi.org/10.1038/25862>
- Oberem J., Richter J.G., Setzer D., Seibold J., Koch I., Fels J. Experiments on localization accuracy with non-individual and individual HRTFs comparing static and dynamic reproduction methods. *bioRxiv*. 2020. P. 1–11. <https://doi.org/10.1101/2020.03.31.011650>
- Otani M., Hirahara T., Ise S. Numerical study on source-distance dependency of head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2009. 125 (5), 3253–3261. <https://doi.org/10.1121/1.3111860>
- Parseihian G., Jouffrais C., Katz B.F. Reaching nearby sources: Comparison between real and virtual sound and visual targets. *Frontiers in Neuroscience*. 2014. V. 8. 269. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00269>
- Pelzer R., Dinakaran M., Brinkmann F., Lepa, S., Grosche P., Weinzierl S. Head-related transfer function recommendation based on perceptual similarities and anthropometric features. *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 148. P. 3809–3817. <https://doi.org/10.1121/10.0002884>
- Perrott D.R., Ambarsoom H., Tucker J. Changes in head position as a measure of auditory localization performance: Auditory psychomotor coordination under monaural and binaural listening conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. V. 82 (5). P. 1637. <https://doi.org/10.1121/1.395155>
- Perrott D.R., Costantino B., Cisneros J. Auditory and visual localization performance in a sequential discrimination task. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. 93 (4), 2134–2138. <https://doi.org/10.1121/1.406675>
- Petersen J. Estimation of loudness and apparent distance of pure tones in a free field. *Acta Acustica united with Acustica*. 1990. 70(1): 61–65.
- Risoud M., Hanson J.N., Gauvrit F., Renard C., Lemesre P.E., Bonne N.X., Vincent C. Sound source localization. *European annals of otorhinolaryngology, head and neck diseases*. 2018. 135 (4): 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.anorl.2018.04.009>
- Rosenblum L.D., Carello C., Pastore R.E. Relative effectiveness of three stimulus variables for locating a moving sound source. *Perception*. 1987. 16 (2): 175–186. <https://doi.org/10.1068/p160175>
- Rummukainen O.S., Robotham T., Habets E.A. Head-Related Transfer Functions for Dynamic Listeners in Virtual Reality. *Applied Sciences*. 2021. 11 (14): 6646. <https://doi.org/10.3390/app11146646>
- Russell M.K. Age and Auditory Spatial Perception in Humans: Review of Behavioral Findings and Suggestions for Future Research. *Front. Psychol.* 2022. V. 13. P. 831670. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.831670>
- Saberi K., Perrott D.R. Lateralization thresholds obtained under conditions in which the precedence effect is assumed to operate. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1990. 87: 1732–1737. <https://doi.org/10.1121/1.399422>
- Seifritz E., Neuhoff J.G., Bilecen D., Scheffler K., Mustovic H. Neural processing of auditory looming in the human brain. *Current Biology*. 2002. V. 12. P. 2147–2151. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(02\)01356-8](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(02)01356-8)
- Shinn-Cunningham B.G., Santarelli S., Kopco N. Tori of confusion: Binaural localization cues for sources within reach of a listener. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000. 107 (3): 1627–1636. <https://doi.org/10.1121/1.428447>
- Shinn-Cunningham B.G., Streeter T., Gyss J.F. Perceptual plasticity in spatial auditory displays. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*. 2005. 2 (4): 418–425. <https://doi.org/10.1145/1101530.1101536>
- Simpson W.E., Stanton L.D. Head movement does not facilitate perception of the distance of a source of sound. *The American journal of psychology*. 1973. V. 86 (1). P. 151–159. <https://doi.org/10.2307/1421856>
- Stevens S.S., Guirao M. Loudness, reciprocity, and partition scales. *Acoust. Soc. Am.* 1962. V. 34 (9B). P. 1466–1471. <https://doi.org/10.1121/1.1918370>
- Strybel T.Z., Perrott D.R. Discrimination of relative distance in the auditory modality: The success and failure of the loudness discrimination hypothesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 1984. V. 76 (1). P. 318–320. <https://doi.org/10.1121/1.391064>
- Strybel T.Z., Manligas C.L., Perrott D.R. Auditory apparent motion under binaural and monaural listening conditions. *Perception & Psychophysics*. 1989. 45 (4): 371–377. <https://doi.org/10.3758/BF03204951>
- Strybel T.Z., Manligas C.L., Chan O., Perrott D.R. A comparison of the effects of spatial separation on apparent motion in the auditory and visual modalities. *Perception & Psychophysics*. 1990. 47 (5): 439–448. <https://doi.org/10.3758/BF03208177>

- Strybel T.Z., Manllgas C.L., Perrott D.R. Minimum audible movement angle as a function of the azimuth and elevation of the source. *Human factors*. 1992. 34 (3): 267–275. <https://doi.org/10.1177/001872089203400302>
- Vartanyan I.A., Andreeva I.G. A psychophysiological study of auditory illusions of approach and withdrawal in the context of the perceptual environment. *The Spanish journal of psychology*. 2007. V. 10 (2). P. 266–276. <https://doi.org/10.1017/S1138741600006533>
- von Békésy G. The moon illusion and similar auditory phenomena. *The American journal of psychology*. 1949. 62 (4): 540–552. <https://doi.org/10.2307/1418558>
- Warren R.M. *Auditory perception: A new analysis and synthesis*. Cambridge, UK. Cambridge University Press, 1999. 241 p.
- Wenzel E.M., Arruda M., Kistler D.J., Wightman F.L. Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *J Acoust Soc Am*. 1993. V. 94. P. 111–23. <https://doi.org/10.1121/1.407089>
- Westermann A., Buchholz J.M. Release from masking through spatial separation in distance in hearing impaired listeners. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013. Acoustical Society of America*. 2013. V. 19. N. 1. P. 050156. <https://doi.org/10.1121/1.4906581>
- Wightman E.R., Firestone F.A. Binaural localization of pure tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1930. 2 (2): 271–280. <https://doi.org/10.1121/1.1915255>
- Yu G., Wang L. Effect of Individualized Head-Related Transfer Functions on Distance Perception in Virtual Reproduction for a Nearby Sound Source. *Archives of Acoustics*. 2019. V. 44, N. 2 P. 251–258. <https://doi.org/10.24425/aoa.2019.128488>
- Zahorik P. Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. *J. Acoust. Soc. Am*. 2002. V. 111. P. 1832–1846. <https://doi.org/10.1121/1.1458027>
- Zahorik P., Wightman F.L. Loudness constancy with varying sound source distance. *Nature Neuroscience*. 2001. V. 4. P. 78–83. <https://doi.org/10.1038/82931>
- Zahorik P., Brungart D.S., Bronkhorst A.W. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica*. 2005. V. 91. N 3. P. 409–420.
- Zhang M., Qiao Y., Wu X., Qu T. Distance-dependent Modeling of Head-related Transfer Functions. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2019. P. 276–280. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683756>
- Zhong X.L., Xie B.S. Head-related transfer functions and virtual auditory display. In: *Soundscape Semiotics-Localization and Categorization*. 2014. <https://doi.org/10.5772/56907>