

УДК 612.85.016.6+612.821.89+612.821.2+616.28-76+534.76+534.773+534.771

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА ПО РАССТОЯНИЮ ПРИ ПАТОЛОГИИ СЛУХА

© 2023 г. Е. А. Огородникова^{1,*}, Е. А. Клишова², И. Г. Андреева²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова
Российской академии наук

199034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук

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

*E-mail: ogorodnikova@infra.ru

Поступила в редакцию 10.08.2023 г.

После доработки 04.09.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

В работе представлен обзор современных экспериментальных подходов, которые применяют для оценки способности к локализации источников звука по расстоянию при патологии слуха. Рассмотрено влияние характерных проявлений нарушений слуха на процессы выделения основных признаков локализации — уровня сигнала, особенностей его спектра, бинаурального взаимодействия при слуховом восприятии расстояния до неподвижных и движущихся источников звука или речи. В обзор включены результаты собственных исследований авторов и литературные данные об изменении разрешающей способности слуха по расстоянию при сенсоневральной тугоухости с разной степенью двусторонней и односторонней потери слуха, центральных слуховых расстройствах, включая возрастные аспекты проблемы. Описан компенсаторный потенциал слуховой пространственной функции при неинвазивном и инвазивном слухопротезировании, а также при ее тренировке с применением элементов акустической виртуальной реальности. Предложен методический подход к формированию пространственных сцен, который доступен для реализации в клинической практике.

Ключевые слова: пространственный слух, сенсоневральная тугоухость, центральные слуховые расстройства, разрешающая способность слуха, локализация по расстоянию, слухопротезирование, тренировка пространственного восприятия, акустическая виртуальная реальность

DOI: 10.31857/S0235009223040054, EDN: ZHZRAS

ВВЕДЕНИЕ

Патология слуха относится к проблемам здоровья, которые по данным статистики демонстрируют постоянный рост и увеличение распространенности среди населения разного возраста. Из материалов Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) следует, что в настоящее время порядка 6% населения земного шара имеют социально значимые (более 40 дБ) нарушения слуха различной этиологии, к 2030 г. количество лиц с инвалидизирующей потерей слуха достигнет 630 млн., к 2050 г. — 900 млн. При этом до 2.5 млрд человек (каждый четвертый на планете) будут подвержены той или иной степени нарушений слуха, большинство из которых потребует реабилитационных услуг (Пресс-релиз ВОЗ, 2021).

Ограничения слухового восприятия в процессе жизнедеятельности пациента с тугоухостью и эффективность их компенсации при слухопротезировании преимущественно оценивают с использованием психоакустических речевых тестов

и ряда опросников: “Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Questionnaire” SSQ (Gatehouse, Noble, 2004; Moulin, Richard, 2016), “Spatial Hearing Questionnaire” SHQ (Tyler et al., 2009), “The Hearing Implant Sound Quality Index” HISQUI (Amann, Anderson, 2014). Методы измерения количественных характеристик локализации при нарушениях пространственного слуха в клинических условиях практически не применяются. Вместе с тем по результатам обследования пациентов стандартными аудиологическими методами и установленному диагнозу определить степень утраты пространственного слуха не представляется возможным (Middlebrooks, 2015). При сходных нарушениях слуха, отражающих пороги слуховой чувствительности, способности пациентов к акустической ориентации могут значительно варьировать

(Альтман, 2011; Makous, Middlebrooks, 1990). Еще одной причиной затруднений с клинической оценкой состояния пространственного слуха является большое число выполняемых им практических задач с вовлечением широкого диапазона параметров не только слухового, но и зрительного восприятия (Perrot et al., 1993; Moore, 2012; Spence et al., 2020; Aggius-Vella et al., 2022). Поэтому детальная оценка состояния слуховой пространственной функции требует длительной процедуры, которая может быть утомительной как для пациента, так и для врача, проводящего обследование. Продвижению в этом плане могут способствовать современные информационные технологии и специализированное программное обеспечение, которые позволяют реализовать адаптивные методы измерения, автоматизировать первичную обработку данных и таким образом ускорить и упростить количественную оценку отдельных перцептивных показателей.

Еще одним и наиболее серьезным препятствием при организации методических условий измерения показателей пространственного слуха выступает необходимость использования особых помещений большого объема с контролируемыми характеристиками отражающих поверхностей и конструкциями с комплексом излучателей, имеющих идентичные амплитудно-частотные характеристики. Эти вопросы частично решаются путем разработки специализированных систем (Muthu et al., 2022) и особых экспериментальных методик, при помощи которых выполнены десятки исследований в области акустической ориентации, в том числе и у пациентов с нарушениями слуха (Andreeva, 2018; Adel Ghahraman et al., 2020; Akeroyd, 2014; Glyde et al., 2011; Moore, 2012). В этих исследованиях получены оценки пространственной разрешающей способности слуха, точности локализации, бинаурального освобождения от маскировки, разборчивости речи при пространственном разделении источников целевого речевого сигнала и шумовой помехи. Несмотря на тщательную методическую проработку данных экспериментальных подходов, они так и не были внедрены в повседневную клиническую практику. Одними из основных причин такой ситуации остаются высокая стоимость оборудования помещений и трудоемкость измерений. В последние десятилетия эта проблема отчасти разрешается за счет развития тенденции к более широкому использованию элементов акустической виртуальной реальности (Андреева, 2004а; Bronkhorst, 2015; Carlile, Leung, 2016; Coudert et al., 2022), но дальнейшее развитие методических подходов к комплексной и количественной оценке базовых показателей пространственного восприятия остается актуальным. Это особенно важно в отношении оценки разрешающей способности по расстоянию и по времени, определяющей способ-

ность человека своевременно реагировать на опасность при локализации источника угрозы. В последние два десятилетия данное направление интенсивно разрабатывалось (обзор Андреева и др., 2023), но вопросы оценки степени нарушения этой способности при различной патологии слуха остаются нерешенными (Kolarik et al., 2016; Moore, 2012; Russel, 2022; Zheng et al., 2022).

В настоящем обзоре дано представление о механизмах анализа признаков локализации звуковых источников по удаленности и о подходах, применяемых для количественной оценки слухового восприятия расстояния. На основе литературных и собственных экспериментальных данных продемонстрировано влияние на эти показатели различной патологии периферического и центрального отделов слуховой системы, описаны возможности коррекции нарушений пространственного восприятия при слухопротезировании и функциональном тренинге ориентации в пространстве по слуху.

ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ УДАЛЕННОСТИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В СЛУХОВЫХ ЦЕНТРАХ

Оценка удаленности до источника звука основана на слуховом анализе совокупности характеристик сигналов, поступающих на оба уха (Zahorik et al., 2005). В зависимости от акустической среды, в которой происходит звукоизлучение, разделяют условия свободного поля и замкнутого помещения, в котором возникают отражения, и в результате многократных отражений звука от его внутренних поверхностей образуется стоячая волна. В последнем случае для характеристики помещения применяют показатели реверберации, зависящие от его размеров и коэффициентов отражения поверхностей в помещении.

Важным физическим условием для формирования признаков по удаленности является ближнее или дальнее (более 3–5 м) акустическое поле, т.е. расстояние от слушателя до источника по отношению к размерам источника звука. Объемный источник звука, например, большой водопад, формирует плоскую звуковую волну на большом протяжении. Большинство источников звука, такие как громкоговоритель, образуют звуковые волны, которые уже на расстоянии более метра можно считать сферическими. В случае сферической волны потеря интенсивности звука с расстоянием будет более быстрой, чем для плоской звуковой волны. Подробное рассмотрение акустических признаков, на основе которых слуховая система формирует топику эгоцентрического пространства, дано в ряде обзоров (Zahorik et al., 2005; Fluitt et al., 2013; Kolarik et al., 2016).

Для слуховой сенсорной системы, как на периферии, так и в слуховых центрах, характерна томотопическая организация. Формирование пространственной топики, согласно современным представлениям, происходит в слуховых центрах на уровне ствола мозга. При этом важнейшим элементом является модуляция слуховой информации проприоцептивными и вестибулярным афферентными потоками, проявления которой при активации движений фиксируются уже на уровне кохлеарных ядер (Lohse et al., 2022). Это позволяет учесть влияние положения и движений головы при формировании слухового пространства. Таким образом, ориентация в пространстве по слуху исходно носит мультисенсорный характер, который затем выявляется и на вышележащих уровнях обработки пространственной информации — в соответствующих центрах среднего мозга и коры больших полушарий.

Нейроны задних холмов могут детектировать междушумные различия по интенсивности, которые являются признаком локализации по удаленности для ближнего поля (Jones et al., 2013). Однако в отмеченном исследовании вопрос о том, могут ли нейроны задних холмов кодировать звуковое расстояние, напрямую не рассматривался, поскольку во многих случаях главным признаком, по которому слушатель определяет расстояние до источника, является интенсивность звука. В то же время интенсивность многих звуковых источников может меняться во времени независимо от расстояния. Поэтому в исследовании механизмов локализации по расстоянию анализ интенсивности звука важен, но оценка расстояния предполагает анализ комплекса признаков, включая также соотношение прямого и первого отраженного сигналов, прямого сигнала и реверберации, междушумные различия и так далее (Zahorik et al., 2005; Fluitt et al., 2013; Kolarik et al., 2016). Одним из ключевых признаков локализации по удаленности в условиях замкнутых помещений, т.е. при наличии реверберации, является потеря амплитудной модуляции в сигнале, которая зависит от расстояния. Заметим, что этот признак является монауральным и не задействует механизмы бинаурального слуха. В работе (Kim et al., 2015) были получены доказательства в поддержку этого механизма монаурального кодирования расстояния. На уровне задних холмов среднего мозга было выявлено сочетание нейрональной чувствительности к глубине амплитудной модуляции и зависящей от расстояния потери глубины амплитудной модуляции при реверберации. Таким образом, на уровне ствола мозга реализуются основные механизмы обработки слуховой пространственной информации, которые могут быть подвергнуты влиянию межсенсорного взаимодействия.

Межсенсорные взаимодействия приобретают особое значение в периперсональном простран-

стве, для которого характерно активное использование контактных и дистантных модальностей при непосредственном взаимодействии с объектом. В исследовании (Graziano et al., 1999) было показано, что многие нейроны в вентральной премоторной коре головного мозга макаки представляют близкое (30 см) слуховое расстояние при помощи сигналов, не зависящих от уровня. Нейронное кодирование приближающегося слухового и мультисенсорного стимула является, по-видимому, единым процессом обработки пространственной информации, приводящим к формированию топики периперсонального пространства (Ghazanfar et al., 2002; Hall and Moore, 2003; Guipponi et al., 2013).

При нейровизуализации процессов обработки пространственной информации звуковая стимуляция в свободном пространстве невозможна в силу методических ограничений подачи звука. Для решения этой проблемы применяют виртуальные звуки, содержащие разные наборы пространственных признаков, создаваемые различными способами, в том числе на основе предварительной записи звука с применением манекенов типа KEMAR — Knowles Electronics Manikin for Acoustical Research (Burkhard, 1978; Paul, 2009). Сложность реализации такого подхода для изучения механизмов локализации источников звука по удаленности заключается в необходимости экстернализации звука, т.е. восприятия источника звука слушателем, как удаленного от него на некоторое расстояние. Поэтому до настоящего времени лишь одной исследовательской группе удалось корректно выполнить эту сложную методическую задачу (Corso et al., 2012; 2020).

Области коры больших полушарий, в которых согласно данным функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) происходит анализ пространственной информации, соответствующий пути “Где?”, расположены в задних областях верхней височной извилины и области *Planum temporale* (Ahveninen et al., 2014; Griffiths, Warren, 2002; Rauschecker, 2015). Примерно в тех же областях были выявлены популяции нейронов, чувствительных к изменениям расстояния до источника звука (Corso et al., 2012; 2020). Причем при моделировании расстояния междушумными различиями по интенсивности для латерального удаления источника звука области активации располагались только в полушарии, контралатеральном положению виртуального источника (Corso et al., 2012), тогда как при его фронтальном положении были активированы оба полушария с недостоверным преобладанием правополушарной активации в упомянутых выше областях (Corso et al., 2020).

Как уже отмечалось, способность анализа и адекватной оценки, меняющейся во времени слу-

ховой информации о положении объектов, является критической для безопасности человека. Однако изучению ее центральных механизмов посвящено лишь ограниченное число работ. При этом изменение интенсивности звука при движении его источника рассматривается как абсолютный признак для локализации. В исследованиях нейрональной активности было подтверждено кодирование направления изменения интенсивности на уровне слуховых центров среднего мозга и первичной слуховой коры (Вартанян, 1978). Стимуляция звуковыми сигналами с возрастающей и уменьшающейся интенсивностью выявило латерализацию этой функции с усилением активности в правой височной области (Mathiak et al., 2003), аналогичная латерализация наблюдалась при наличии стимулов с реверберацией (Altmann et al., 2013).

Применение фМРТ показало, что повышение интенсивности звука по сравнению с ее уменьшением активирует области, формирующие распределенную нейронную сеть, которая включает верхнюю височную борозду и среднюю височную извилину, правую височно-теменную область, правую моторную и премоторную кору (Seifritz et al., 2002; Pavani et al., 2002). Прослушивание приближающихся и удаляющихся шагов человека, предварительно записанных через пару микрофонов в замкнутом помещении с реверберацией, выявило двухстороннюю активацию в ряде мультисенсорных областей — надкраевой и угловой извилинах (39 и 40 поля по Бродману), а также в предклинье и у отдельных испытуемых в области МТ/V5 (Andreeva et al., 2018). Ранее было показано, что эти области коры специализированы на обработке пространственной информации (Vossia et al., 2014). Таким образом, нейрофизиологические данные по обработке слуховой информации об удаленности источника звука свидетельствуют о том, что анализ расстояния выполняется в рамках дорзального слухового пути.

НАРУШЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПАТОЛОГИИ СЛУХА

Нарушения пространственного восприятия могут проявляться при разных формах тугоухости, а также при возрастном снижении сенсорных показателей и при центральных слуховых расстройствах (Moore, 2012; Musiek, Chermak, 2014; Альтман, Таварткиладзе, 2003; Бобошко и др., 2014). Изучение механизмов, обеспечивающих ориентацию в пространстве по слуху и компенсаторные возможности организма при нарушениях данной функции, являются важными направлениями фундаментальных исследований, которые дополнительно актуализируются в связи с развитием высокотехнологичных методов слухопро-

тирования, включая кохлеарное имплантирование (Kolarik et al., 2016; Koroleva, Ogorodnikova, 2019; Courtois et al., 2019; Zheng et al., 2022). При этом исследования преимущественно относятся к локализации источников звука по азимуту (обзоры: Keating, King, 2013; Kolarik et al., 2016) и значительно реже — к локализации по вертикали и по расстоянию (Baumgartner et al., 2016; Lundbeck et al., 2017; Gvozdeva et al., 2019; Andreeva et al., 2020).

Ухудшение пространственного восприятия при патологии слуха может вызывать психологический дискомфорт и снижение ощущения безопасности, которые в значительной степени связаны с изменением условий сенсорного мониторинга заднего полупространства человека, осуществляемого преимущественно слуховой системой (Spence et al., 2020; Aggius-Vella et al., 2022). Выраженность ухудшения пространственной ориентации и, в частности, оценки расстояния при различных слуховых нарушениях, определяется характером и степенью патологических процессов. При нарушениях на периферии слуха происходит снижение абсолютных и дифференциальных порогов уровня интенсивности звука и частоты, которое может затрагивать как весь слышимый диапазон частот, так и его отдельные, преимущественно высокочастотные или низкочастотные области. Патологические изменения могут включать дисфункцию внутренних и наружных волосковых клеток, дегенерацию волокон слухового нерва, при которой меняется скорость передачи нервных импульсов от уровня звука (Reiss et al., 2011) и последующие нарушения в работе нейронных компонентов слухового анализатора (Moore, 2012; Musiek, Chermak, 2014; Бобошко и др., 2014).

При патологии центральных отделов слуховой системы, как правило, нарушаются процессы слухового анализа, снижается временное разрешение, наблюдается ухудшение бинаурального и межполушарного взаимодействия. Эти виды нарушений слуховой обработки приводят к значительному искажению слухового пространства и восприятия траекторий движения источников звука (Altman et al., 1987; 2004; Vartanyan et al., 1999; Kotelenko et al., 2000; 2007; Паренко и др., 2009). Важно отметить, что центральные слуховые расстройства могут критически ухудшать состояние пространственного восприятия и при практически нормальных показателях тонального слуха (пороги слышимости). В свою очередь сходные потери слуха, которые в клинической практике оценивают по данным аудиограмм, не всегда приводят к одинаковым проявлениям нарушений в восприятии пространства (Noble et al., 1994). Таким образом, изменения пространственного восприятия имеют выраженные индивидуальные особенности и могут существенно различаться при одинаковых формах периферической

Таблица 1. Возможные проявления нарушений в процессе выделения основных признаков локализации по расстоянию при сенсоневральной тугоухости и пресбиакузисе

Основные признаки локализации по расстоянию		Норма слуха	СНТ / пресбиакузис		
			Одно ухо	Два уха	ФУНГ
Монауральные	Интенсивность	+++	+ / ++ (степень потери слуха)	+ / ++ (степень потери слуха)	+ / ++ (динамический диапазон)
	Спектр	+++	+ / ++ (тип аудиограммы)	+ / ++ (тип аудиограммы)	+++
Бинауральные	Межушные различия по времени	+++	- / + / ++ (проявления ЦСР)	- / + / ++ (проявления ЦСР)	+++
	Межушные различия по интенсивности	+++	- / + / ++ (степень потери слуха) + при движении головы	- / + / ++ (степень потери слуха; ЦСР)	- / + / ++ (динамический диапазон)
Эхо	Прямой сигнал / реверберация	+++	- / + / ++ (степень потери слуха, ЦСР)	- / + / ++ (степень потери слуха; ЦСР)	- / + / ++ (динамический диапазон)

Примечание: “–, +, ++, +++” – условные обозначения для степени реализации процессов выделения данного признака по отношению к условной норме “+++”; в скобках отмечены основные факторы, влияющие на диапазон проявления их нарушения “+ / ++; – / + / ++”.

патологии слуха. Это обстоятельство позволяет предположить, что недиагностированные центральные нарушения слуха могут существенно влиять на результаты локализации звука по удаленности.

Одной из наиболее распространенных форм патологии слуха является сенсоневральная тугоухость (СНТ), которая проявляется в снижении слуховой чувствительности, вплоть до полной утраты слуха. При СНТ поражаются участки звуковоспринимающей системы слухового анализатора, преимущественно рецепторного аппарата улитки (Альтман, Твартиладзе, 2003; Moore, 2007). Помимо повышения порогов слуха, дополнительным фактором изменения слухового восприятия при СНТ может выступать нарушение кодирования надпороговых сигналов (Moore, King, 1999; Tyler et al., 2014) или феномен усиленного нарастания громкости (ФУНГ, рекруитмент), который приводит к сжатию шкалы громкости. Это нарушение слухового восприятия не только ухудшает разборчивость речи, но и затрудняет оценку удаленности источника звука и его радиального движения (удаления или приближения к слушателю), ориентированную на мониторинг интенсивности сигнала.

Снижение слуха при СНТ может быть односторонним (симметричным/несимметричным), по всему диапазону частот или преимущественно в высокочастотной области слышимости (Бабияк, Накатис, 2005; Королева, 2022). Последний тип нарушения, наряду с ФУНГ, осо-

бенно характерен для возрастной тугоухости (пресбиакузиса). При пресбиакузисе прогрессирующая симметричная потеря слуха на высоких частотах (нисходящая аудиограмма) часто сопровождается проявлениями субъективного шума в ушах и центральными слуховыми расстройствами (Pienkowski et al., 2014; Fischer et al., 2016; Sharma et al., 2020; Голованова и др., 2019; Кунельская и др., 2019).

Таким образом, как бинауральные, так и монауральные механизмы, используемые слуховой системой для оценки расстояния от слушателя до источника звука, при сенсоневральной тугоухости могут функционировать иначе, чем при нормальном слухе (Akeroyd, 2014; Kolarik et al., 2016; Zheng et al., 2022). В табл. 1 показана степень возможного влияния выделенных нарушений слуха на анализ основных признаков локализации по расстоянию, а также отмечены факторы, от которых она зависит.

Снижение или потеря слуха в диапазоне высоких частот приводит к нарушению обработки пространственной информации, прежде всего в сагиттальной плоскости, поскольку спектральные признаки локализации источника звука по вертикали находятся преимущественно в этой частотной области (Otte et al., 2013; Baumgartner et al., 2016). Учитывая зависимость от степени тугоухости (потери слуха), ситуация с таким проявлением СНТ представляет интерес как модель постепенного выключения высокочастотного бинаурального механизма пространственного слуха

при оценке расстояния до неподвижного источника звука и в случае его приближения или удаления (Андреева и др., 2018; Andreeva et al., 2020; Гвоздева и др. 2020a).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПО РАССТОЯНИЮ ПРИ НАРУШЕНИЯХ СЛУХА

Несмотря на распространенность СНТ, включая пресбиакузис, исследования, в которых оценивается ее влияние на пространственную оценку расстояния по слуху, крайне немногочисленны (Akeroyd et al., 2007; Akeroyd, 2010; Courtois et al., 2019; Klishova et al., 2021). Основную методическую сложность для их проведения представляет создание контролируемой акустической среды, что особенно затруднительно в условиях клиники. Для таких измерений важно обеспечить достаточный диапазон расстояний до источника звука, снижение реверберации в рабочем помещении или оценку акустических параметров реверберации в замкнутом пространстве (Андреева и др., 2023). Для упрощения ситуации с характеристиками помещения применяют другой методический подход, который предполагает использование виртуальной среды (экстернализация звуковых сигналов), создаваемой при помощи головных телефонов. При этом экстернализация звука, приводящая к восприятию удаленного на расстоянии более 1 м звукового источника, возникает только на основе предварительной записи исходного звукового сигнала, которую обычно выполняют в специальных помещениях и с применением акустических манекенов. Этот прием был использован в работе (Akeroyd et al., 2007) при сравнении эффективности восприятия удаленности в зависимости от уровня сигнала и показателя реверберации (соотношение прямого и отраженных сигналов), при норме слуха и при I—II степени тугоухости. Испытуемые оценивали расстояние до неподвижного источника речи в диапазоне виртуальных расстояний от 1 до 8 м. При расстояниях меньше 5 м испытуемые с патологией слуха продемонстрировали результаты, близкие к норме, когда они могли использовать оба признака — изменение уровня сигнала и показатель реверберации. Для расстояний, превышающих 5 м, было получено ухудшение оценки расстояния. При выравнивании в месте расположения пациента интенсивности сигналов от виртуальных источников на разных расстояниях, испытуемые оказались не способны к их правильной локализации. Результаты свидетельствовали о дефиците способности различать расстояние при СНТ только на основе признака реверберации. Однако применение виртуальных звуков в большинстве исследований не учитывает то об-

стоятельство, что локализация по слуху является результатом мультисенсорного взаимодействия и уже на уровне ствола мозга слуховой афферентный поток может модулироваться за счет частичного подавления сигналами от других модальностей (см. раздел о центральных механизмах обработки пространственной информации). В результате применение метода экстернализации может приводить к результатам, отличным от тех, которые будут получены в свободном пространстве и при сканирующих движениях головы слушателя.

Еще один методический подход к формированию звуковых образов в условиях свободного пространства, позволяющий проводить оценку функции ориентации, был предложен в работах (Пак, Огородникова, 1997; Altman, Andreeva, 2004). В последней работе виртуальное движение звукового источника формировали за счет линейно меняющейся амплитуды посылок шума, предъявляемых через два динамика, разнесенных на 3 м и фиксирующих границы траектории движения в реальном пространстве. С его помощью было проверено предположение о том, что симметричная потеря высокочастотного слуха, характерная для пресбиакузиса, приводит к ухудшению локализации по расстоянию за счет частичного включения бинаурального механизма, основанного на межшумных различиях по интенсивности.

При моделировании частичной симметричной потери высокочастотного слуха в свободном поле была оценена способность к пространственному восприятию движения — обнаружению приближения и удаления источника звука при разной длительности сигнала (Андреева и др., 2018). Модельные стимулы были получены путем фильтрации широкополосных сигналов и формировали образы приближающихся и удаляющихся источников звука. Амплитудно-частотные характеристики фильтрации соответствовали легкой и умеренной степени СНТ с нисходящей аудиограммой. Моделируемое среднее снижение порогов в речевой области частот (500—4000 Гц) составляло 26 и 55 дБ соответственно. Результаты, полученные при обследовании способности к локализации модельных сигналов в группе с нормальным слухом, показали, что моделируемый дисбаланс высоко- и низкочастотной составляющих спектра не оказывает значимого воздействия на оценку направления движения. Пороговая длительность сигналов во всех сериях измерений (норма, модели легкой и умеренной СНТ) была сходной и составляла 0.15 с. При этом при восприятии контрольных сигналов и стимулов, содержащих признаки движения в модели легкой степени СНТ, испытуемые допускали больше ошибок при оценке удаления. Эта особенность сохранялась при всех исследованных длительностях сигналов — от 0.125 до 0.4 с. Моделирование

Таблица 2. Пространственные и временные пороги локализации неподвижных и движущихся источников звука в норме и при I–III степени сенсоневральной тугоухости (СНТ)

Показатели локализации источников звука		Норма слуха	СНТ, степень		
			I	II	III
По расстоянию (ближе – дальше)					
Пространственная разрешающая способность, %	Неподвижные источники	9	11	–	–
		(6–16)	(7–26)		
	движущиеся источники	14	29	–	–
		(7–23)	(7–66)		
Временная разрешающая способность для оценки направления движущихся источников, мс		130	450	450	500
		(75–250)	(100–1300)	(100–1300)	(300–500)
По азимуту (вправо – влево)					
Временная разрешающая способность для оценки направления движущихся источников, мс		93	250	1000	–
		(75–100)	100–1200)	(200–1500)	

умеренной степени тугоухости выявило увеличение доли ошибок при оценке приближения звукового образа. В то же время общее количество ошибок по сравнению с контролем возросло незначительно.

Пороги по расстоянию для движущихся звуковых образов со сниженной долей высоких частот в спектре сигнала были измерены в работе (Гвоздева, Андреева, 2019). В группе испытуемых с нормальным слухом пороги для фильтрованных сигналов оказались в 2 раза меньше, чем для сигналов с плоским спектром. Результаты этих работ подтверждают, что при сохранении механизмов надпорогового кодирования, уменьшение в спектре сигнала вклада высоких частот не снижает пространственную разрешающую способность слуха по расстоянию.

Методический подход к формированию неподвижных и движущихся (приближение-удаление) звуковых образов с использованием двух динамиков был применен для оценки состояния пространственного слуха при СНТ в клинических условиях (Klishova et al., 2021). Исследования способности к локализации по расстоянию проводили в помещении объемом 51 м³ с применением звукопоглощающих материалов, которые позволили существенно снизить показатель реверберации (RT60 = 460 мс). Расстояние от слушателя до звукового образа меняли, синхронно подавая на два динамика звуковые сигналы, различающиеся только по интенсивности. Генерируемый в этих условиях звуковой образ мог быть неподвижным или движущимся в диапазоне расстояний 0.7–3 м. Данный методический подход позволяет оценить способность к локализации по расстоянию для наиболее актуального диапазона, предполагающего дальнейшее непосредственное взаимодействие с источником звука (Андреева и др., Патент РФ № 2754342. 2021). При участии

испытуемых с симметричной СНТ I–III степени была проведена серия измерений по сравнительной оценке пространственной и временной разрешающей способности слуха для неподвижных и движущихся звуковых образов (Andreeva et al., 2020; Gvozdeva et al., 2021; Klishova et al., 2021; Андреева и др., 2019; Гвоздева и др., 2020а). Показано, что разрешающая способность по расстоянию для неподвижных источников звука при СНТ I степени по сравнению с нормой слуха снизилась незначительно. В случае движущихся источников звука она менялась в более широком диапазоне и могла ухудшаться в значительной степени. Количественные оценки пространственной и временной разрешающей способности, полученные в этих работах, представлены в табл. 2.

Основные результаты этой серии работ показали, что частичного выключения высокочастотного бинаурального механизма недостаточно для снижения разрешающей способности по расстоянию и времени. Вместе с тем ухудшение показателей локализации у пациентов с СНТ может возникать и при небольшой потере слуха. Как следует из табл. 2, результаты пациентов со сниженным слухом сильно варьировали и могли как совпадать с данными нормы, так и отличаться от них в несколько раз. При локализации движущихся источников пороговые временные и пространственные показатели и при СНТ и при норме слуха достоверно повышались. Эта особенность восприятия хорошо согласуется с данными литературы о локализации неподвижных и движущихся источников звука по другим координатам акустического пространства (Гвоздева и др., 2020б; Ситдииков и др., 2020; Brimijoin, Akeroyd; 2014; Chandler, Grantham, 1992; Perrott, Musicant, 1977).

Влияние степени снижения слуховой чувствительности на временные показатели пространственного восприятия было показано в работе

(Гвоздева и др., 2020а), в которой был проведен сравнительный анализ показателей локализации движущихся источников звука по расстоянию и азимуту. В исследовании приняли участие пациенты с I, II и III степенью СНТ. Пороги по времени, необходимому для оценки направления движения звукового образа по радиальной координате, составили в обследованных группах 0.4, 0.7 и 0.9 с соответственно. Сравнение результатов показало, что различия между группами пациентов с I и III степенью СНТ были достоверными ($p < 0.01$, критерий Манна-Уитни). При этом во всех трех группах пороги были существенно выше, чем пороги при норме слуха, определенные ранее и равные 0.15 с. Средние (по группе и по двум полуплоскостям) значения порогов по времени для оценки направления движения звуковых образов по азимутальной координате равнялись 0.5, 0.5 и 0.9 с для I, II и III степеней СНТ соответственно.

При этом порог при III степени СНТ оказался достоверно выше, чем при I и II степенях СНТ ($p < 0.05$ и $p < 0.01$ соответственно). Достоверных различий в порогах по времени при сравнении данных для двух координат выявлено не было. Таким образом, при снижении слуха от нормы до I степени СНТ, а затем при росте потери слуха, наблюдается увеличение временных порогов при оценке движения источника звука независимо от его пространственной ориентации, т.е. как по радиальной, так и по азимутальной координате. Заметное увеличение значений порогов, по сравнению с нормой слуха, возникало при восприятии динамически изменяющихся сигналов, определяющих движение звуковых образов, у 42% испытуемых с тугоухостью. Было высказано предположение, что причиной ухудшения локализации может быть нарушение процессов временного слухового анализа. Для проверки этого предположения было выполнено сравнение индивидуальных значений дифференциальных порогов по длительности и по расстоянию при движении звукового образа, результаты которого подтвердили значимую корреляцию этих данных. Еще одно косвенное свидетельство влияния вовлеченности центральных отделов слуховой системы в патологический процесс при одинаковом снижении слуха было получено при рассмотрении анамнеза пациентов. Ухудшение временных и пространственных показателей наблюдали преимущественно у пациентов, которые перенесли инфаркты мозга или сердца (Gvozdeva et al., 2020). На основании данных, полученных в этом цикле работ, можно сделать вывод, что при частичном сохранении высокочастотного бинаурального механизма слуха способность к пространственной оценке расстояния у большинства пациентов с СНТ остается близкой к норме. В то же время вопрос о связи нарушений временного

слухового анализа с показателями локализации по расстоянию при движении источника звука требует дополнительного направленного исследования.

Полное исключение бинаурального механизма слуха, например, в случае односторонней глухоты, определяет большую выраженность нарушений пространственного восприятия вследствие нарушения метрики для базовых бинауральных признаков — междушумных различий во времени и по интенсивности (Makous, Middlebrooks, 1990; Kumpik, King, 2019). Нарушения в выделении бинауральных различий в первую очередь будут проявляться при локализации источника звука по азимуту, но также могут повлиять и на оценку расстояния. В работе (Альтман, Андреева, 2000) было показано, что односторонняя потеря слуха приводит к увеличению инерционности процессов слуховой локализации при оценке приближения/удаления источников звука. Влияние инерционности обнаружено и при использовании звуковой стимуляции полосовыми шумами в диапазоне частот ниже 3000 Гц: порог по длительности при оценке направления движения источников звука вдоль радиальной оси увеличивался с 0.2 до 0.3 с (Андреева, 2004б). Эти данные подтверждают участие в восприятии приближения (удаления) источников звука высокочастотного бинаурального механизма и показывают, что оценка направления движения источника звука может требовать больше времени при полной потере слуха на высоких частотах.

В контексте воздействия на показатели пространственного восприятия рассматривается возможная роль слуховых аппаратов (СА), которые за счет своих характеристик могут влиять на оценку слушателем уровня сигналов и реверберации, а также бинауральных признаков расстояния, прежде всего междушумных различий по интенсивности (Musa-Shufani et al., 2006; Simon, Levitt, 2007). Большинство современных СА включают амплитудную компрессию. За счет компрессии тихие звуки дополнительно усиливают, а интенсивность слишком громких сигналов ограничивается, что может изменять результаты перцептивной оценки уровня стимула и реверберации, меняя соотношение прямого и отраженного сигналов. При восприятии непрерывной речи этот эффект действует в основном во время речевых пауз, и может считаться незначительным. Подтверждение этому получено в исследовании (Akeyoyd, 2010), где побочные эффекты линейной компрессии в СА выявлены не были. Сходные данные в случае нелинейного сжатия диапазона сигналов в СА были получены в работе (Courtois et al., 2019). Однако вопрос о способах и характеристиках компрессии в технических средствах слухопротезирования (слуховые аппараты, кохлеарные импланты), а также о вкладе компрессии

в изменение эффективности действия монауральных признаков локализации еще не решен окончательно и требует дальнейшего исследования (Zheng et al., 2022).

КОМПЕНСАТОРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СЛУХА

В контексте компенсации нарушений пространственного слуха, помимо развития современных технологий слухопротезирования, представленного многоканальными цифровыми слуховыми аппаратами, аппаратами костной проводимости, кохлеарными и стволомозговыми имплантами, следует рассматривать и потенциал пластичности центральной нервной системы. Он проявляется при адаптации к новым условиям восприятия и в процессе функциональных перцептивных тренировок. Для пользователей кохлеарных имплантов (КИ) обучение и тренировки представляют необходимый элемент реабилитации с учетом дефицита сенсорного опыта ориентации в акустическом пространстве и несформированности центральных механизмов пространственного слуха в случае врожденной или ранней глухоты (Огородникова и др., 2005; Ricketts et al., 2006; Peters et al., 2010; Королева, 2022). Это находит подтверждение в результатах тренировки пространственного слуха, свидетельствующих об улучшении показателей ориентации у пациентов как после двусторонней, так и после односторонней кохлеарной имплантации (Koroleva, Ogorodnikova, 2019; Огородникова и др., 2020; Ludwig et al., 2021; Coudert et al., 2022; Nisha et al., 2023).

При односторонней имплантации такие тренировки проводились в ограниченном помещении с применением экспериментальной модели двух динамиков и виртуального движения (Огородникова и др., 2020), а также в свободном поле (Ludwig et al., 2021). В обоих случаях было показано, что пациенты с одним кохлеарным имплантом и остаточным слухом на контралатеральном ухе способны к пространственной ориентации на основе бинауральных признаков МРИ и МРВ, но испытывают трудности в точности локализации источников, расположенных фронтально или со стороны действующего импланта. В работе (Zheng et al., 2017) отмечалось также, что пользователи одного КИ более чувствительны к воздействию фоновых помех и реверберации.

При двусторонней имплантации появляются условия для использования бинауральных признаков локализации (Schön et al., 2005). Вместе с тем индивидуальные данные по способности пользователей двух кохлеарных имплантов к локализации значительно варьируют. В случае ранней потери слуха и поздней реабилитации, они демонстрируют минимум преимуществ в пространственной ориентации по сравнению с одно-

сторонней имплантацией, особенно на начальном этапе тренинга (Norpp et al., 2004). В целом современные подходы к тренировке пространственного восприятия с использованием виртуальной среды обеспечивают достоверное улучшение результатов локализации в большинстве случаев двусторонней имплантации (Coudert et al., 2021; Королева и др., 2021). Тем не менее пространственный слух у всех пользователей КИ остается хуже нормы, особенно в условиях ближнего поля, фиксации головы, отсутствия визуального подкрепления (Coudert et al., 2021). У них наблюдается большое число ошибок локализации типа “front-back confusions” при расположении источников звука в передней или задней части пространства. Оценка расстояния до источника звука также остается сложной задачей, что частично определяется характеристиками компрессии звука и направленности принимающих микрофонов в процессорах КИ (Courtois et al., 2019; Ernst et al., 2019; Zheng et al., 2022). При этом точность локализации может достоверно повышаться естественным образом за счет движений головы пользователя, особенно при восприятии им фронтальных целей (Coudert et al., 2021).

Таким образом, обучение в условиях формируемой акустической среды может способствовать повышению эффективности локализации и точности оценки расстояния до источника звука. Это направление в развитии реабилитационных технологий является актуальным не только для пользователей КИ, но и для пациентов с различными нарушениями слуха, включая возрастную тугоухость (Nisha et al., 2023). Одним из ограничений при его практической организации, как и в случае диагностики нарушений пространственного восприятия, выступает методическое обеспечение адекватных условий для проведения тренировок и измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка показателей пространственной разрешающей способности в отношении зрения сегодня является рутинной клинической процедурой, тогда как адекватные подходы к такой оценке для слуха еще находятся в стадии разработки. В этом направлении можно выделить методики с применением предзаписи звуковых сигналов для формирования виртуальной акустической среды, которые описаны в ряде экспериментальных исследований с участием пациентов с патологией слуха и после слухопротезирования (Akeroyd, 2010; Boyd et al., 2012; Lundbeck et al., 2017). Однако степень соответствия, в которой они могут представлять реальное звуковое поле, а также состояние пространственного слуха, пока остается неизвестной (Lundbeck et al., 2017) и продолжает обсуждаться (Zheng et al., 2022). В силу таких огра-

ничений, данные, полученные при помощи технологии формирования виртуальной среды с экстернализацией звука, имеют скорее качественный, чем точный количественный характер, что определяет ограничения их применения в клинических условиях. Широко применяемые в мировой сурдологической практике опросники, направленные на оценку пространственного слуха, также дают лишь общее представление о способности пациента ориентироваться по слуху (Gatehouse, Noble, 2004; Amann, Anderson, 2014; Moulin, Richard, 2016). В то же время потребность в оценке состояния пространственного слуха не только остается актуальной, но и возрастает в связи с урбанизацией, повышением уровня шумов в повседневной жизнедеятельности человека и развитием технических средств слухопротезирования, которые позволяют в значительной мере реализовать бинауральные механизмы слуха даже при существенных нарушениях слуховой функции.

В целях развития методической базы исследований и клинической оценки способности к локализации, включая локализацию по расстоянию, с участием авторов разработан гибридный подход к созданию пространственной сцены, использующий реальные источники звука и формирующий неподвижные и движущиеся звуковые образы, положение и траектория движения которых в условиях свободного поля фиксированы (Пак, Огородникова, 1997; Огородникова, Пак, 1998; Altman, Andreeva, 2004). Данный подход позволил получить количественные характеристики пространственного и временного разрешения для пространственного слуха у пациентов с разной степенью СНТ при достаточно высокой точности (Андреева и др., 2018; Гвоздева, Андреева, 2019; Клишова и др., 2021). В частности, у пациентов с тугоухостью был впервые измерен порог по времени, необходимому для оценки направления движения источников звука, и показано его значительное отличие от данных при норме слуха. Совокупность полученных результатов позволила сформулировать гипотезу о важной роли сохранности механизмов временного анализа в обеспечении локализации движущихся источников звука при СНТ. Диагностическая ценность предлагаемого метода будет проверена при проведении дополнительных исследований.

Методический подход к оценке количественных показателей на основе предложенной гибридной модели оформлен как новый способ скрининговой оценки пространственного слуха, который прошел патентование и находится в процессе клинической апробации (Андреева и др., 2021). В отличие от опросников, он позволяет получить количественные характеристики пространственного восприятия и основные показатели локализации по расстоянию у пациентов в

достаточно доступных методических условиях. Его практическое применение будет способствовать объективизации процедур настройки технических средств слухопротезирования с подготовкой нормативных оценок, соответствующих степени утраты функции акустической ориентации, включая способность определения по слуху расстояния до источника звука.

Сходная модель уже включена в систему тренировок пользователей КИ и СА для ускорения процессов адаптации к новым условиям восприятия и формирования адекватных процессов центрального слухового анализа пространственной акустической информации (Королева и др., 2013; Огородникова и др., 2020).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (темы № 075-00967-23-00 и № AAAA-A18-118050790159-4).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Идея и планирование обзора принадлежит И.Г. Андреевой и Е.А. Огородниковой, сбор данных научной литературы, написание и редактирование работы — И.Г. Андреевой, Е.А. Огородниковой, Е.А. Клишовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман Я.А. *Пространственный слух*. СПб.: Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН. 2011. 311 с.
- Альтман Я.А., Андреева И.Г. Восприятие приближения и удаления звукового образа под разными азимутальными углами при моноауральном прослушивании. *Сенсорные системы*. 2000. Т. 14. № 1. С. 11–17.
- Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А. *Руководство по аудиологии*. М.: ДМК Пресс, 2003. С. 360.
- 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., Гвоздева А.П., Огородникова Е.А. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника при моделировании снижения высокочастотного слуха. *Сенсорные системы*. 2018. Т. 32. № 4. С. 277–284. <https://doi.org/10.1134/S0235009218040029>
- Андреева И.Г., Клишова Е.А., Гвоздева А.П., Голованова Л.Е. Метод оценки временных показателей пространственного слуха при сенсоневральной ту-

- гоухости 2–3 степени. *Труды XXXII-й Сессии Российского Акустического Общества*. М.: ГЕОС. 2019. с. 840–845.
- Андреева И.Г., Ситдилов 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.
- Андреева И.Г., Ситдилов В.М., Огородникова Е.А. Экспериментальные подходы к изучению локализации источников звука по расстоянию. *Сенсорные системы*. 2023. Т. 37. № 3. С. 183–204. <https://doi.org/10.31857/S0235009223030022>
- Бабиак В.И., Накатис Я.А. *Клиническая оториноларингология: Руководство для врачей*. СПб.: Гиппократ. 2005. 800 с.
- Бобошко М.Ю., Гарбарук Е.С., Жилинская Е.В., Салахбеков М.А. Центральные слуховые расстройства (обзор литературы). *Российская оториноларингология*. 2014. № 5. С. 87.
- Вартанян И.А. *Слуховой анализ сложных звуков*. Л: Наука. 1978. 151 с.
- 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.
- Гвоздева А.П., Клишова Е.А., Голованова Л.Е., Андреева И.Г. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника в норме и при сенсоневральной тугоухости 2–3-й степени. *Российская оториноларингология*. 2020а. Т. 19. № 1. С. 19–24. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24>
- Гвоздева А.П., Ситдилов В.М., Андреева И.Г. Скрининговый метод оценки пространственной и временной разрешающей способности слуха при локализации движения по азимутальной координате. *Рос. физиол. журн.* 2020б. Т. 106. № 9. С. 1170–1188. <https://doi.org/10.31857/S0869813920090113>
- Голованова Л.Е., Бобошко М.Ю., Квасов Е.А., Лаптева Е.С. Тугоухость у взрослого населения старших возрастных групп. *Успехи геронтологии*. 2019. Т. 32. № 1–2. С. 166–173. Режим доступа: http://www.ger-society.ru/netcat_files/userfiles/10/AG_2019-32-01-02.pdf.
- Клишова Е.А., Гвоздева А.П., Голованова Л.Е., Андреева И.Г. Временные характеристики локализации источника звука, движущегося по азимуту, у пациентов с легкой и умеренной сенсоневральной тугоухостью. *Рос. физиол. журн.* 2021. Т. 107. № 12. С. 1568–1582. <https://doi.org/10.31857/S0869813921120049>
- Королева И.В. *Основы аудиологии и слухопротезирования*. СПб: КАРО, 2022. 448 с.
- Королева И.В., Огородникова Е.А., Пак С.П., Левин С.В., Балякова А.А., Шапорова А.В. Методические подходы к оценке динамики развития процессов слухоречевого восприятия у детей с кохлеарными имплантами. *Российская оториноларингология*. 2013. № 3. С. 75–85.
- Королева И.В., Огородникова Е.А., Левин С.В., Пак С.П., Кузовков В.Е., Янов Ю.К. Использование психоакустических тестов для перцептивной оценки настройки процессора кохлеарного импланта у глухих пациентов. *Вестник оториноларингологии*. 2021. Т. 86. № 1. С. 30–35. <https://doi.org/10.17116/otorino20218601130>
- Кунельская Н.Л., Левина Ю.В., Гаров Е.В., Дзюина А.В. Пресбиакузис – актуальная проблема стареющего населения. *Вестник оториноларингологии*. 2019. Т. 84. № 4. С. 67–71. <https://doi.org/10.17116/otorino20198404167>
- Огородникова Е.А., Королева И.В., Пак С.П. Восприятие пространственных характеристик звуковых сигналов пациентами после односторонней кохлеарной имплантации. *Вестник психофизиологии*. 2020. № 3. С. 195–199.
- Огородникова Е.А., Королева И.В., Пак С.П. *Способ реабилитации функции акустической ориентации и ее оценки у пациентов с кохлеарным имплантом*. Патент РФ. № 2265426. 2005.
- Огородникова Е.А., Пак С.П. Различение человеком скорости движения при фронтальном приближении 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.
- Паренко М.К., Антипенко Е.А., Кузнецова И.А., Щербаков В.И. Восприятие дихотически предъявляемых звуковых шелчков при дисциркуляторной энцефалопатии. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 3. С. 208–218.
- Пресс-релиз ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения). 2021. <https://www.who.int/ru/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050> (дата доступа 9.03.2023).
- Ситдилов В.М., Гвоздева А.П., Андреева И.Г. Дифференциальные пороги слуха при локализации движущихся и неподвижных источников звука для расстояний, типичных при коммуникации. *Труды Всероссийской акустической конференции*. СПб. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. С. 336–339.
- Adel Ghahraman M., Ashrafi M., Mohammadkhani G., Jalaie S. Effects of aging on spatial hearing. *Aging clinical and experimental research*. 2020. V. 32 (4). P. 733–739. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01233-3>
- 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. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014. V. 18. P. 2331216514560442. <https://doi.org/10.1177/2331216514560442>
- Akeroyd M.A. The effect of hearing-aid compression on judgments of relative distance. *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 127 (1). P. 9–12. <https://doi.org/10.1121/1.3268505>

- 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>
- Altman Y.A., Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Subjective acoustic field of patients with cortical temporal lobe epilepsy as revealed using signals simulating various directions of sound movement. *Human Physiology*. 2004. V. 30. P. 152–158.
<https://doi.org/10.1023/B:HUMP.0000021642.52947.a2>
- Altmann C.F., Ono K., Callan A., Matsushashi M., Mima T., Fukuyama H. Environmental reverberation affects processing of sound intensity in right temporal cortex. *European Journal of Neuroscience*. 2013. V. 38 (8). P. 3210–3220.
- Altman J., Rosenblum A., Lvova V. Lateralization of a moving auditory image in patients with focal damage of the brain hemispheres. *J. Neuropsychol.* 1987. V. 25 (2). P. 435.
- Amann E., Anderson I. Development and validation of a questionnaire for hearing implant users to self-assess their auditory abilities in everyday communication situations: the Hearing Implant Sound Quality Index (HISQUI19). *Acta Oto-Laryngologica*. 2014. V. 134 (9). P. 915–923.
<https://doi.org/10.3109/00016489.2014.909604>
- 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., 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>
- Andreeva I.G., Orlov V.A., Ushakov V.L. Activation of multimodal areas in the human cerebral cortex in response to biological motion sounds. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2018. V. 54. P. 363–373.
- Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling the effects of sensorineural hearing loss on sound localization in the median plane. *Trends Hear.* 2016. V. 20. Special issue. P. 1.
<https://doi.org/10.1177/2331216516662003>
- Boyd A.W., Whitmer W.M., Soraghan J.J., Akeroyd M.A. Auditory externalization in hearing-impaired listeners: The effect of pinna cues and number of talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. V. 131 (3). P. 268.
<https://doi.org/10.1121/1.3687015>
- Boccia M., Nemmi F., Guariglia C. Neuropsychology of environmental navigation in humans: review and meta-analysis of fMRI studies in healthy participants. *Neuropsychol. Rev.* 2014. V. 24 (2). P. 236–251.
- Brimjoin W.O., Akeroyd M.A. The moving minimum audible angle is smaller during self motion than during source motion. *Frontiers in Neuroscience*. 2014. V. 8. P. 273.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00273>
- 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>
- Burkhard M. Non hearing-aid uses of the KEMAR manikin. *Manikin Measurements*. Industrial Research Products Inc. 1978. P. 63–65.
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in hearing*. 2016. V. 20. P. 2331216516644254.
<https://doi.org/10.1177/2331216516644254>
- Chandler D.W., Grantham D.W. Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91 (3). P. 1624–1636.
<https://doi.org/10.1121/1.402443>
- Coudert A., Gaveau V., Gatel J., Verdet G., Salemm R., Farne A., Pavani F., Truy E. Spatial hearing difficulties in reaching space in bilateral cochlear implant children improve with head movements. *Ear & Hearing*. 2021. V. 43 (1). P. 192–205.
<https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001090>
- Coudert A., Verdet 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>
- Courtois G., Grimaldi V., Lissek H., Estoppey P., Georganti E. Perception of auditory distance in normal-hearing and moderate-to-profound hearing-impaired listeners. *Trends in Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1177/2331216519887615>
- Ernst A., Anton K., Brendel M., Battmer R-D. Benefit of directional microphones for unilateral, bilateral and bimodal cochlear implant users. *Cochlear Implants International*. 2019. V. 20 (9). P. 1–11.
<https://doi.org/10.1080/14670100.2019.1578911>
- Fischer N., Weber B., Riechelmann H. Presbycusis – age related hearing loss. *Laryngorhinootologie*. 2016. V. 95. № (7). P. 497–510.
<https://doi.org/10.1055/s-0042-106918>
- Fluitt K.F., Mermagen T., Letowski T. Auditory perception in open field: Distance estimation. *Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Human Research and Engineering Directorate*. 2013.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1182.7602>
- Gatehouse S., Noble W. “Speech, Spatial, and Qualities of Hearing” questionnaire. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43 (2). P. 85–99.
<https://doi.org/10.1080/14992020400050014>
- Ghazanfar A.A., Neuheff J.G., Logothetis N.K. Auditory looming perception in rhesus monkeys. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2002. V. 99. P. 15755–15757.
- Glyde H., Hickson L., Cameron S., Dillon H. Problems hearing in noise in older adults: a review of spatial processing disorder. *Trends in amplification*. 2011. V. 15 (3). P. 116–126.
<https://doi.org/10.1177/1084713811424885>
- Graziano M.S., Reiss L.A., Gross C.G. A neuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature*. 1999. V. 397. P. 428–430.

- Griffiths T.D., Warren J.D. The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences*. 2002. V. 25. P. 348–353.
- Guipponi O., Wardak C., Ibarrola D., Comte J.C., Sappey-Marini D., Pine`de S., Ben Hamed S. Multimodal convergence within the intraparietal sulcus of the macaque monkey. *J Neurosci*. 2013. V. 33. P. 4128–4139.
- 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>
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Golovanova L.E., Andreeva I.G. The influence of previous myocardial infarctions on the temporal threshold for sound source motion localization in patients with sensorineural hearing loss. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2020. V. 56 (7). P. 763–773.
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Andreeva I.G. Minimal time to determine direction of azimuthally moving sounds in moderately severe sensorineural hearing loss. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2021. V. 43 (1). P. 050003.
- Hall D.A., Moore D.R. Auditory neuroscience: The salience of looming sounds. *Current Biology*. 2003. V. 13 (3). R91–R93.
[https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00034-4)
- Jones H.G., Koka K., Tollin D.J. The sound source distance dependence of the acoustical cues to location and their encoding by neurons in the inferior colliculus: implications for the duplex theory. In: *Basic aspects of hearing* (Moore BCJ, ed). New York: Springer. 2013. P. 273–282.
- Keating P., King A.J. Developmental plasticity of spatial hearing following asymmetric hearing loss: context-dependent cue integration and its clinical implications. *Frontiers in systems neuroscience*. 2013. V. 7 (123).
<https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00123>
- Kim D.O., Zahorik P., Carney L.H., Bishop B.B., Kuwada S. Auditory distance coding in rabbit midbrain neurons and human perception: monaural amplitude modulation depth as a cue. *Journal of Neuroscience*. 2015. V. 35 (13). P. 5360–5372.
- Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E., Andreeva I.G. Temporal characteristics of azimuthally moving sound source localization in patients with mild and moderate sensorineural hearing loss. *J. Evol. Biochem. Phys.* 2021. V. 57. P. 1499–1510.
<https://doi.org/10.1134/S0022093021060260>
- 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>
- Kopčo N., Doreswamy K.K., Huang S., Rossi S., Ahveninen J. Cortical auditory distance representation based on direct-to-reverberant energy ratio. *NeuroImage*. 2020. V. 208. P. 116436.
- Kopčo N., Huang S., Belliveau J.W., Raji T., Tengshe C., Ahveninen J. Neuronal representations of distance in human auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. V. 109 (27). P. 11019–11024.
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. In: *Neural Networks and Neurotechnologies* (edc: Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova). SPb, Publish by VVM. 2019. P. 231–249.
- Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Comparative characteristics of spatial hearing of patients with different forms of cortical epilepsy. *Human Physiology*. 2000. V. 26. P. 148–153.
<https://doi.org/10.1007/BF02760085>
- Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. The subjective auditory space of epileptic patients with lesions in both the temporal cortical area and the hippocampus. *Hum Physiol*. 2007. V. 33. P. 539–545.
<https://doi.org/10.1134/S0362119707050040>
- Kumpik D.P., King A.J. A review of the effects of unilateral hearing loss on spatial hearing. *Hear Res*. 2019. V. 372. P. 17–28.
<https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.08.003>
- Lohse M., Zimmer-Harwood P., Dahmen J.C., King A.J. Integration of somatosensory and motor-related information in the auditory system. *Frontiers in Neuroscience*. 2022. V. 16. P. 1010211.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1010211>
- Ludwig A.A., Meuret S., Battmer R-D., Schönwiesner M., Fuchs M., Ernst A. Sound localization in single-sided deaf participants provided with a cochlear implant. *Front. Psychol*. 2021. V. 12. P. 753339.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.753339>
- 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>
- Makous J.C., Middlebrooks J.C. Two-dimensional sound localization by human listeners. *The journal of the Acoustical Society of America*. 1990. V. 87 (5). P. 2188–2200.
<https://doi.org/10.1121/1.399186>
- Mathiak K., Hertrich I., Kincses W.E., Riecker A., Lutzenberger W., Ackermann H. The right supratemporal plane hears the distance of objects: neuromagnetic correlates of virtual reality. *Neuroreport*. 2003. V. 14. № (3). P. 307–311.
- 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>
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Moore B.C.J. *Cochlear hearing loss: Physiological, psychological, and technical issues* (2nd ed.). Wiley. 2007. 332 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)
- Moulin A., Richard C. Sources of variability of Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ) scores in normal-hearing and hearing-impaired populations. *Int J Audiol*. 2016. V. 55 (2). P. 101–109.
<https://doi.org/10.3109/14992027.2015.1104734>
- Musa-Shufani S., Walger M., von Wedel H., Meister H. Influence of dynamic compression on directional hearing in the horizontal plane. *Ear and hearing*. 2006. V. 27

- (3). P. 279–285.
<https://doi.org/10.1097/01.aud.0000215972.68797.5e>
- Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.
- Muthu A.N.P., Fathima H., Kanagokar V., Bhat J.S., Kumar S. A system for spatial hearing research. *MethodsX*. 2022. V. 9. P. 101727.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101727>
- Nisha K.V., Uppunda A.K., Kumar R.T. Spatial rehabilitation using virtual auditory space training paradigm in individuals with sensorineural hearing impairment. *Front. Neurosci.* 2023. V. 16. P. 1080398.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1080398>
- Noble W., Byrne D., Lepage B. Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1994. V. 9 (2). P. 992–1005.
<https://doi.org/10.1121/1.408404>
- Nopp P., Schleich P., D'haese P. Sound localization in bilateral users of MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implants. *Ear and hearing*. 2004. V. 25 (3). P. 205–214.
<https://doi.org/10.1097/01.AUD.0000130793.20444.50>
- Otte R.J., Agterberg M.J.H., Wanrooij M.M.V., Snik A.F.M., Van Opstal A.J. Age-related hearing loss and ear morphology affect vertical but not horizontal sound-localization performance. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2013. V. 14 (2). P. 261–273.
<https://doi.org/10.1007/s10162-012-0367-7>
- Paul S. Binaural recording technology: A historical review and possible future developments. *Acta Acustica united with Acustica*. 2009. V. 95. P. 767–788.
<https://doi.org/10.3813/AAA.918208>
- Pavani F., Macaluso E., Warren J.D., Driver J., Griffiths T.D. A common cortical substrate activated by horizontal and vertical sound movement in the human brain. *Curr. Biol.* 2002. V. 12 (18). P. 1584–1590.
- 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>
- Perrott D.R., Musicant A.D. Minimum auditory movement angle: binaural localization of moving sound sources. *Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62 (6). P. 1463–1466.
<https://doi.org/10.1121/1.381675>
- Peters B.R., Wyss J., Manrique M. Worldwide trends in bilateral cochlear implantation. *Laryngoscope*. 2010. V. 120 (2). P. 17–44.
<https://doi.org/10.1002/lary.20859>
- Pienkowski M., Tyler R.S., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozoski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A Review of Hyperacusis and Future Directions: Part II. Measurement, Mechanisms, and Treatment. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 420.
https://doi.org/10.1044/2014_AJA-13-0037
- Rauschecker J.P. Auditory and visual cortex of primates: A comparison of two sensory systems. *Eur J Neurosci.* 2015. V. 41. P. 579–585.
- Reiss D., Zanetti M., Neukum G. Multitemporal observations of identical active dust devils on Mars with the High Resolution Stereo Camera (HRSC) and Mars Orbiter Camera (MOC). *Icarus*. 2011. V. 215 (1). P. 358–369.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.011>
- Ricketts T.A., Grantham D.W., Ashmead D.H., Haynes D.S., Labadie R.F. Speech recognition for unilateral and bilateral cochlear implant modes in the presence of uncorrelated noise sources. *Ear and hearing*. 2006. V. 27 (6). P. 763–773.
<https://doi.org/10.1097/01.aud.0000240814.27151.b9>
- 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>
- Schoen F., Mueller J., Helms J., Nopp P. Sound localization and sensitivity to interaural cues in bilateral users of the Med-El Combi 40/40+ cochlear implant system. *Otology & Neurotology*. 2005. V. 26 (3). P. 429–437.
<https://doi.org/10.1097/01.mao.0000169772.16045.86>
- Seifritz E., Neuheff 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)
- Sharma R.K., Lalwani A.K., Golub J.S. Prevalence and severity of hearing loss in the older old population. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*. 2020. V. 146(8). P. 762–763.
<https://doi.org/10.1001/jamaoto.2020.0900>
- Simon H.J., Levitt H. Effect of dual sensory loss on auditory localization: implications for intervention. *Trends in Amplification*. 2007. V. 11 (4). P. 259–272.
<https://doi.org/10.1177/1084713807308209>
- Tyler R.S., Perreau A.E., Ji H. The validation of the spatial hearing questionnaire. *Ear and hearing*. 2009. V. 30 (4). P. 466–474.
<https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61efe>
- Tyler R.S., Pienkowski M., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozoski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 402.
https://doi.org/10.1044/2014_AJA-14-0010
- Vartanyan I.A., Tarkhan A.U., Chernigovskaya T.V. Participation of the left and right hemispheres of the human brain in the formation of a subjective acoustic field. *Fiziol. Chel.* 1999. V. 25 (1). P. 43.
- 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.
- Zheng Y., Koehnke J., Besing J. Combined effects of noise and reverberation on sound localization for listeners with normal hearing and bilateral cochlear implants. *American Journal of Audiology*. 2017. V. 26 (4). P. 519–530.
https://doi.org/10.1044/2017_AJA-16-0101
- Zheng Y., Swanson J., Koehnke J., Guan J. Sound localization of listeners with normal hearing, impaired hearing, hearing aids, bone-anchored hearing instruments, and cochlear implants: a review. *American Journal of Audiology (AJA)*. 2022. V. 31 (3). P. 819–834.
https://doi.org/10.1044/2022_AJA-22-00006

Experimental Approaches to the Study of Sound Sources Localization by Distance in Hearing Pathology

E. A. Ogorodnikova^{a,*}, E. A. Klishova^b, and I. G. Andreeva^b

^a Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences,
199034, Makarov emb., 6, St. Petersburg, Russia

^b Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences,
194223, pr. M. Tórez, 44, St. Petersburg, Russia

*E-mail: ogorodnikovaea@infran.ru

The overview presents modern experimental approaches that are used to assess the ability to localize sound sources by distance in hearing pathology. The influence of the typical manifestations of hearing impairment on the processes of identifying the main localization cues – the signal level, the spectral features, binaural characteristics in auditory perception of the distance to stationary and moving sound or speech sources is considered. The review introduce to the results of the authors' own research and literature data on changes in hearing resolution by distance in sensorineural hearing loss, unilateral hearing loss, central auditory disorders, including age-related aspects of the problem. The compensatory potential of the auditory spatial function in non-invasive and invasive hearing aids, as well as its training with elements of acoustic virtual reality, is described. A methodical approach to forming of spatial scenes available for implementation in clinical practice is proposed.

Key words: spatial hearing, sensorineural hearing loss, central auditory processing disorders, hearing resolution, distance localization, hearing aids, spatial perception training, acoustic virtual reality

REFERENCES

- Altman J.A. *Prostranstvennyy sluh* [Spatial hearing]. SPb: Institut fiziologii im. I.P. Pavlova RAN [Pavlov Institute of Physiology RAS]. 2011. 311 p. (in Russian).
- Altman J.A., Andreeva I.G. *Vospriyatie priblizheniya i udaleniya zvukovogo obraza pod raznymi azimutal'nymi uglami pri monaural'nom proslushivaniy.* [Perception of approach and withdrawing of a sound image at different azimuthal angles during monaural listening] Sensory systems. 2000. V. 14 (1). P. 11–17 (in Russian).
- Altman J.A., Tavartkiladze G.A. *Rukovodstvo po audiologii.* [Handbook on audiology]. M.: DMK Press, 2003. P. 360 (in Russian).
- Andreeva I.G. *Virtual'naya akusticheskaya real'nost': psikoakusticheskie issledovaniya.* [Virtual Acoustic Reality: Psychoacoustic Research] Sensory systems. 2004a. V. 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 signals during human perception of radial motion of sound images of different spectral composition] Sensory systems. 2004b. V. 18 (3). P. 233–238 (in Russian).
- Andreeva I.G., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A. *Porogovaya dlitel'nost' zvukovykh signalov dlya otsenki priblizheniya i udaleniya ikh istochnika pri modelirovani snizheniya vysokochastotnogo slukha.* [Threshold duration of sound signals for their sources approaching and withdrawing under condition of high-frequency hearing loss modeling] Sensory systems. 2018. V. 32 (4). P. 277–284. <https://doi.org/10.1134/S0235009218040029> (in Russian).
- Andreeva I.G., Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E. *Metod otsenki vremennykh pokazatelei prostranstvennogo slukha pri sensorneural'noi tugoukhosti 2-3 stepeni.* [A method for assessing temporal indicators of spatial hearing in sensorineural hearing loss of 2–3 degrees] Trudy XXXII-i Sessii Rossiiskogo Akusticheskogo Obshchestva [Proceedings of the XXXII-th Session of the Russian Acoustic Society]. M.: GEOS. 2019. P. 840–845 (in Russian).
- Andreeva I.G., Sitdikov V.M., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A., Golovanova L.E., Klishova E.A. *Sposob skringovoi otsenki sposobnosti cheloveka k razlicheniyu polozheniya istochnikov zvuka po rasstoyaniyu.* [A method for screening assessment of a human's ability to distinguish between the position of sound sources by distance] Patent RF. № 2754342. 2021. (in Russian).
- Andreeva I.G., Sitdikov V.M., Ogorodnikova E.A. *Eksperimental'nyye podkhody k izucheniyu lokalizatsii istochnikov zvuka po rasstoyaniyu.* [Experimental methods to study the sound source localization by distance in humans]. Sensory systems. 2023. V. 37 (3). P. 183–204. <https://doi.org/10.31857/S0235009223030022> (in Russian).
- Babiyak V.I., Nakatis J.A. *Klinicheskaya otorinolaringologiya: Rukovodstvo dlya vrachei.* [Clinical otorhinolaryngology: A guide for physicians.] SPb: Gippokrat. 2005. 800 p. (in Russian).
- Boboshko M.J., Garbaruk E.S., Zhilinskaya E.V., Salakhbekov M.A. *Tsentrallye slukhovye rasstroistva (obzor literatury).* [Central auditory processing disorders (literature review)] Russian otorhinolaryngology. 2014. V. 5. P. 87 (in Russian).
- Vartanyan I.A. *Slukhovo analiz slozhnykh zvukov.* [Auditory analysis of complex sounds.] Leningrad: Nauka [The science]. 1978. 151 p. (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. *Metod otsenki vremennykh pokazatelei prostranstvennogo slukha pri sensorneural'noi tugoukhosti 2–3 stepeni.* [Method for assessing temporal indicators of spatial hearing in sensorineural hearing loss of 2–3 degrees] Materialy XXXII Sessii Rossiiskogo Akusticheskogo Obshchestva. [Materials of the

- XXXII Session of the Russian Acoustic Society.] М., 2019. P. 113 (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Golovanova L.E., Andreeva I.G. *Porogovaya dlitel'nost' zvukovykh signalov dlya otsenki priblizheniya i udaleniya ikh istochnika v norme i pri sensonevral'noy tugoukhosti 2-3-y stepeni* [Threshold duration of audio signals for assessment of approaching and receding of their source in normal condition and in 2nd and 3rd degree sensorineural hearing loss]. Russian Otorhinolaryngology. 2020a. V. 19 (1). P. 19–24. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24> (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Sitdikov V.M., Andreeva I.G. *Skriningovyi metod otsenki prostranstvennoi i vremennoi razreshayushchei sposobnosti slukha pri lokalizatsii dvizheniya po azimutal'noi koordinate*. [Screening method for assessing the spatial and temporal resolution of hearing in the localization of movement along the azimuthal coordinate] Russian Journal of Physiology. 2020b. V. 106 (9). P. 1170–1188. <https://doi.org/10.31857/S0869813920090113> (in Russian).
- Golovanova L.E., Boboshko M.J., Kvasov E.A., Lapteva E.S. *Tugoukhost' u vzroslogo naseleniya starshikh vozrastnykh grupp*. [Hearing loss in the adult population of older age groups]. Uspekhi gerontologii [Advances in gerontology]. 2019. V. 32 (1–2). P. 166–173. Режим доступа: http://www.gersociety.ru/netcat_files/user_files/10/AG_2019-32-01-02.pdf (in Russian).
- Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E., Andreeva I.G. *Vremennyye kharakteristiki lokalizatsii istochnika zvuka, dvizhushchegosya po azimutu, u patsientov s legkoi i umerennoi sensonevral'noi tugoukhost'yu*. [Temporal Characteristics of Azimuthally Moving Sound Source Localization in Patients with Mild and Moderate Sensorineural Hearing Loss.] Russian Journal of Physiology. 2021. V. 107 (12). P. 1568–1582. <https://doi.org/10.31857/S0869813921120049> (in Russian).
- Koroleva I.V. *Osnovy audiologii i slukhoprotezirovaniya*. [Fundamentals of audiology and hearing aid]. SPb.: KARO, 2022. 448 p. (in Russian).
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A., Pak S.P., Levin S.V., Baliakova A.A., Shaporova A.V. *Metodicheskiye podkhody k otsenke dinamiki razvitiya protsessov slukhorechevogo vospriyatiya u detey s kokhlearnymi implantami*. [Methodological approaches to assessing the dynamics of the development of hearing and speech perception processes in children with cochlear implants] Russian Otorhinolaryngology. 2013. N 3. P. 75–85. (in Russian).
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A., Levin S.V., Pak S.P., Kusovkov V.E., Yanov J.K. *Ispol'zovaniye psikhakusticheskikh testov dlya pertseptivnoy otsenki nastroyki protsessora kokhlearnogo implanta u glukhikh patsiyentov* [Using of psychoacoustic tests for perceptual assessment of processor fitting in patients with cochlear implants] Vestnik Oto-Rino-Laringologii [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 2021. V. 86 (1). P. 30–35. <https://doi.org/10.17116/otorino20218601130> (in Russian).
- Kunel'skaya N.L., Levina Iu.V., Garov E.V., Dzuina A.V., Ogorodnikov D.S., Nosulia E.V., Luchsheva Yu.V. *Presbiakuzis – aktual'naya problema stareyushchego naseleniya* [Presbycusis is the actual problem of the aging population] Vestnik Oto-Rino-Laringologii [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 2019. V. 84 (4). P. 67–71. <https://doi.org/10.17116/otorino20198404167> (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Koroleva I.V., Pak S.P. *Vospriyatiye prostranstvennykh kharakteristik zvukovykh signalov patsiyentami posle odносторонney kokhlearnoy implantatsii* [Perception of spatial characteristics of sound signals by patients after unilateral cochlear implantation] Psychophysiology news. 2020. V. 3. P. 195–199 (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Koroleva I.V., Pak S.P. *Sposob reabilitatsii funktsii akusticheskoi orientatsii i ee otsenki u patsientov s kokhlearnym implantom*. [Method for Rehabilitation of Acoustic Orientation Function and Its Assessment in Patients with Cochlear Implant.] Patent RF. № 2265426. 2005 (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.] 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 udalenii*. [Formation of acoustic stimuli that simulate the movement of a sound source as it approaches and moves away.] Sensory systems. 1997. V. 11 (3). P. 346–351 (in Russian).
- Parento M.K., Antipenko E.A., Kuznetsova I.A., Shcherbakov V.I. *Vospriyatie dikhoticheski pred'yavlyayemykh zvukovykh shchelchkov pri distsirkulyatornoi entsefalopatii*. [Perception of dichotically presented sound clicks in dyscirculatory encephalopathy.] Sensory systems. 2009. V. 23 (3). P. 208–218 (in Russian).
- Press release of WHO (World Health Organization.). 2021. <https://www.who.int/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050> (access date 9.03.2023).
- Sitdikov V.M., Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. *Differentsial'nye porogi slukha pri lokalizatsii dvizhushchikhsya i nepodvizhnykh istochnikov zvuka dlya rasstoyaniy, tipichnykh pri kommunikatsii*. [Differential hearing thresholds for the localization of moving and stationary sound sources for distances typical in communication.] Trudy Vserossiiskoi akusticheskoi konferentsii [Proceedings of the All-Russian Acoustic Conference]. SPb. POLITEKH-PRESS. 2020. P. 336–339. (in Russian).
- Adel Ghahraman M., Ashrafi M., Mohammadkhani G., Jalaie S. Effects of aging on spatial hearing. *Aging clinical and experimental research*. 2020. V. 32 (4). P. 733–739. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01233-3>
- 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. V. 18: 2331216514560442. <https://doi.org/10.1177/2331216514560442>

- Akeroyd M.A. The effect of hearing-aid compression on judgments of relative distance. *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 127 (1). P. 9–12. <https://doi.org/10.1121/1.3268505>
- 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>
- Altman Y.A., Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Subjective acoustic field of patients with cortical temporal lobe epilepsy as revealed using signals simulating various directions of sound movement. *Human Physiology*. 2004. V. 30. P. 152–158. <https://doi.org/10.1023/B:HUMP.0000021642.52947.a2>
- Altmann C.F., Ono K., Callan A., Matsushashi M., Mima T., Fukuyama H. Environmental reverberation affects processing of sound intensity in right temporal cortex. *European Journal of Neuroscience*. 2013. V. 38 (8). P. 3210–3220.
- Altman J., Rosenblum A., Lvova V. Lateralization of a moving auditory image in patients with focal damage of the brain hemispheres. *J. Neuropsychol.* 1987. V. 25 (2). P. 435.
- Amann E., Anderson I. Development and validation of a questionnaire for hearing implant users to self-assess their auditory abilities in everyday communication situations: the Hearing Implant Sound Quality Index (HISQUI9). *Acta Oto-Laryngologica*. 2014. V. 134 (9). P. 915–923. <https://doi.org/10.3109/00016489.2014.909604>
- 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., 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>
- Andreeva I.G., Orlov V.A., Ushakov V.L. Activation of multimodal areas in the human cerebral cortex in response to biological motion sounds. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2018. V. 54. P. 363–373.
- Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling the effects of sensorineural hearing loss on sound localization in the median plane. *Trends Hear.* 2016. V. 20. Special issue. P. 1. <https://doi.org/10.1177/2331216516662003>
- Boyd A.W., Whitmer W.M., Soraghan J.J., Akeroyd M.A. Auditory externalization in hearing-impaired listeners: The effect of pinna cues and number of talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. V. 131 (3). P. 268. <https://doi.org/10.1121/1.3687015>
- Boccia M., Nemmi F., Guariglia C. Neuropsychology of environmental navigation in humans: review and meta-analysis of fMRI studies in healthy participants. *Neuropsychol. Rev.* 2014. V. 24 (2). P. 236–251.
- Brimjoin W.O., Akeroyd M.A. The moving minimum audible angle is smaller during self motion than during source motion. *Frontiers in Neuroscience*. 2014. V. 8. P. 273. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00273>
- 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>
- Burkhard M. Non hearing-aid uses of the KEMAR manikin. *Manikin Measurements*. Industrial Research Products Inc. 1978. P. 63–65.
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in hearing*. 2016. 20: 2331216516644254. <https://doi.org/10.1177/2331216516644254>
- Chandler D.W., Grantham D.W. Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91 (3). P. 1624–1636. <https://doi.org/10.1121/1.402443>
- Coudert A., Gaveau V., Gatel J., Verdet G., Salemm R., Farne A., Pavani F., Truy E. Spatial hearing difficulties in reaching space in bilateral cochlear implant children improve with head movements. *Ear & Hearing*. 2021. V. 43 (1). P. 192–205. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001090>
- Coudert A., Verdet 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>
- Courtois G., Grimaldi V., Lissek H., Estoppey P., Georganti E. Perception of auditory distance in normal-hearing and moderate-to-profound hearing-impaired listeners. *Trends in Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–18. <https://doi.org/10.1177/2331216519887615>
- Ernst A., Anton K., Brendel M., Battmer R.-D. Benefit of directional microphones for unilateral, bilateral and bimodal cochlear implant users. *Cochlear Implants International*. 2019. V. 20 (9). P. 1–11. <https://doi.org/10.1080/14670100.2019.1578911>
- Fischer N., Weber B., Riechelmann H. Presbycusis – age related hearing loss. *Laryngorhinootologie*. 2016. V. 95. N (7). P. 497–510. <https://doi.org/10.1055/s-0042-106918>
- Fluitt K.F., Mermagen T., Letowski T. Auditory perception in open field: Distance estimation. *Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Human Research and Engineering Directorate*. 2013. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1182.7602>
- Gatehouse S., Noble W. “Speech, Spatial, and Qualities of Hearing” questionnaire. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43 (2). P. 85–99. <https://doi.org/10.1080/14992020400050014>
- Ghazanfar A.A., Neuheff J.G., Logothetis N.K. Auditory looming perception in rhesus monkeys. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2002. V. 99. P. 15755–15757.
- Glyde H., Hickson L., Cameron S., Dillon H. Problems hearing in noise in older adults: a review of spatial processing disorder. *Trends in amplification*. 2011. V. 15 (3). P. 116–126. <https://doi.org/10.1177/1084713811424885>
- Graziano M.S., Reiss L.A., Gross C.G. A neuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature*. 1999. V. 397. P. 428–430.
- Griffiths T.D., Warren J.D. The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences*. 2002. V. 25. P. 348–353.

- Guipponi O., Wardak C., Ibarrola D., Comte J.C., Sappey-Mariniér D., Pine'de S., Ben Hamed S. Multimodal convergence within the intraparietal sulcus of the macaque monkey. *J Neurosci.* 2013. V. 33. P. 4128–4139.
- 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>
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Golovanova L.E., Andreeva I.G. The influence of previous myocardial infarctions on the temporal threshold for sound source motion localization in patients with sensorineural hearing loss. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology.* 2020. V. 56 (7). P. 763–773.
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Andreeva I.G.. Minimal time to determine direction of azimuthally moving sounds in moderately severe sensorineural hearing loss. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2021. V. 43 (1). P. 050003.
- Hall D.A., Moore D.R. Auditory neuroscience: The salience of looming sounds. *Current Biology.* 2003. V. 13 (3). R91–R93. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00034-4)
- Jones H.G., Koka K., Tollin D.J. The sound source distance dependence of the acoustical cues to location and their encoding by neurons in the inferior colliculus: implications for the duplex theory. In: *Basic aspects of hearing* (Moore BCJ, ed). New York: Springer. 2013. P. 273–282.
- Keating P., King A.J. Developmental plasticity of spatial hearing following asymmetric hearing loss: context-dependent cue integration and its clinical implications. *Frontiers in systems neuroscience.* 2013. V. 7 (123). <https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00123>
- Kim D.O., Zahorik P., Carney L.H., Bishop B.B., Kuwada S. Auditory distance coding in rabbit midbrain neurons and human perception: monaural amplitude modulation depth as a cue. *Journal of Neuroscience.* 2015. V. 35 (13). P. 5360–5372.
- Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E., Andreeva I.G. Temporal characteristics of azimuthally moving sound source localization in patients with mild and moderate sensorineural hearing loss. *J. Evol. Biochem. Phys.* 2021. V. 57. P. 1499–1510. <https://doi.org/10.1134/S0022093021060260>
- 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>
- Kopčo N., Doreswamy K.K., Huang S., Rossi S., Ahveninen J. Cortical auditory distance representation based on direct-to-reverberant energy ratio. *NeuroImage.* 2020. V. 208. P. 116436.
- Kopčo N., Huang S., Belliveau J. W., Raji T., Tengshe C., Ahveninen J. Neuronal representations of distance in human auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2012. V. 109 (27). P. 11019–11024.
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. In: *Neural Networks and Neurotechnologies* (edc: Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova). SPb, Publish by VVM. 2019. P. 231–249.
- Kotel'niko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Comparative characteristics of spatial hearing of patients with different forms of cortical epilepsy. *Human Physiology.* 2000. V. 26. P. 148–153. <https://doi.org/10.1007/BF02760085>
- Kotel'niko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. The subjective auditory space of epileptic patients with lesions in both the temporal cortical area and the hippocampus. *Hum Physiol.* 2007. V. 33. P. 539–545. <https://doi.org/10.1134/S0362119707050040>
- Kumpik D.P., King A.J. A review of the effects of unilateral hearing loss on spatial hearing. *Hear Res.* 2019. V. 372. P. 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.08.003>
- Lohse M., Zimmer-Harwood P., Dahmen J.C., King A.J. Integration of somatosensory and motor-related information in the auditory system. *Frontiers in Neuroscience.* 2022. V. 16. P. 1010211. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1010211>
- Ludwig A.A., Meuret S., Battmer R-D., Schönwiesner M., Fuchs M., Ernst A. Sound localization in single-sided deaf participants provided with a cochlear implant. *Front. Psychol.* 2021. V. 12. P. 753339. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.753339>
- 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>
- Makous J.C., Middlebrooks J.C. Two-dimensional sound localization by human listeners. *The journal of the Acoustical Society of America.* 1990. V. 87 (5). P. 2188–2200. <https://doi.org/10.1121/1.399186>
- Mathiak K., Hertrich I., Kincses W.E., Riecker A., Lutzenberger W., Ackermann H. The right supratemporal plane hears the distance of objects: neuromagnetic correlates of virtual reality. *Neuroreport.* 2003. V. 14. N (3). P. 307–311.
- 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>
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing.* Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Moore B.C.J. *Cochlear hearing loss: Physiological, psychological, and technical issues* (2nd ed.). Wiley. 2007. 332 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)
- Moulin A., Richard C. Sources of variability of Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ) scores in normal-hearing and hearing-impaired populations. *Int J Audiol.* 2016. V. 55 (2). P. 101–109. <http://doi.org/10.3109/14992027.2015.1104734>
- Musa-Shufani S., Walger M., von Wedel H., Meister H. Influence of dynamic compression on directional hearing in the horizontal plane. *Ear and hearing.* 2006. V. 27 (3). P. 279–285. <https://doi.org/10.1097/01.aud.0000215972.68797.5e>
- Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder.* San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.

- Muthu A.N.P., Fathima H., Kanagokar V., Bhat J.S., Kumar S. A system for spatial hearing research. *MethodsX*. 2022. V. 9. P. 101727. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101727>
- Nisha K.V., Uppunda A.K., Kumar R.T. Spatial rehabilitation using virtual auditory space training paradigm in individuals with sensorineural hearing impairment. *Front. Neurosci.* 2023. V. 16. P. 1080398. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1080398>
- Noble W., Byrne D., Lepage B. Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1994. V. 9 (2). P. 992–1005. <https://doi.org/10.1121/1.408404>
- Nopp P., Schleich P., D'haese P. Sound localization in bilateral users of MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implants. *Ear and hearing*. 2004. V. 25 (3). P. 205–214. <https://doi.org/10.1097/01.AUD.0000130793.20444.50>
- Otte R.J., Agterberg M.J.H., Wanrooij M.M.V., Snik A.F.M., Van Opstal A.J. Age-related hearing loss and ear morphology affect vertical but not horizontal sound-localization performance. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2013. V. 14 (2). P. 261–273. <https://doi.org/10.1007/s10162-012-0367-7>
- Paul S. Binaural recording technology: A historical review and possible future developments. *Acta Acustica united with Acustica*. 2009. V. 95. P. 767–788. <https://doi.org/10.3813/AAA.918208>
- Pavani F., Macaluso E., Warren J.D., Driver J., Griffiths T.D. A common cortical substrate activated by horizontal and vertical sound movement in the human brain. *Curr. Biol.* 2002. V. 12 (18). P. 1584–1590.
- 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>
- Perrott D.R., Musicant A.D. Minimum auditory movement angle: binaural localization of moving sound sources. *Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62 (6). P. 1463–1466. <https://doi.org/10.1121/1.381675>
- Peters B.R., Wyss J., Manrique M. Worldwide trends in bilateral cochlear implantation. *Laryngoscope*. 2010. V. 120 (2). P. 17–44. <https://doi.org/10.1002/lary.20859>
- Pienkowski M., Tyler R.S., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozoski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A Review of Hyperacusis and Future Directions: Part II. Measurement, Mechanisms, and Treatment. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 420. https://doi.org/10.1044/2014_AJA-13-0037
- Rauschecker J.P. Auditory and visual cortex of primates: A comparison of two sensory systems. *Eur. J. Neurosci.* 2015. V. 41. P. 579–585.
- Reiss D., Zanetti M., Neukum G. Multitemporal observations of identical active dust devils on Mars with the High Resolution Stereo Camera (HRSC) and Mars Orbiter Camera (MOC). *Icarus*. 2011. V. 215 (1). P. 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.011>
- Ricketts T.A., Grantham D.W., Ashmead D.H., Haynes D.S., Labadie R.F. Speech recognition for unilateral and bilateral cochlear implant modes in the presence of uncorrelated noise sources. *Ear and hearing*. 2006. V. 27 (6). P. 763–773. <https://doi.org/10.1097/01.aud.0000240814.27151.b9>
- 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>
- Schoen F., Mueller J., Helms J., Nopp P. Sound localization and sensitivity to interaural cues in bilateral users of the Med-El Combi 40/40+ cochlear implant system. *Otology & Neurotology*. 2005. V. 26 (3). P. 429–437. <https://doi.org/10.1097/01.mao.0000169772.16045.86>
- Seifritz E., Neuheff 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)
- Sharma R.K., Lalwani A.K., Golub J.S. Prevalence and severity of hearing loss in the older old population. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2020. V. 146 (8). P. 762–763. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2020.0900>
- Simon H.J., Levitt H. Effect of dual sensory loss on auditory localization: implications for intervention. *Trends in Amplification*. 2007. V. 11 (4). P. 259–272. <https://doi.org/10.1177/1084713807308209>
- Tyler R.S., Perreau A.E., Ji H. The validation of the spatial hearing questionnaire. *Ear and hearing*. 2009. 30 (4): 466–474. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61efe>
- Tyler R.S., Pienkowski M., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozoski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 402. https://doi.org/10.1044/2014_AJA-14-0010
- Vartanyan I.A., Tarkhan A.U., Chernigovskaya T.V. Participation of the left and right hemispheres of the human brain in the formation of a subjective acoustic field. *Fiziol. Chel.* 1999. V. 25 (1). P. 43.
- 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.
- Zheng Y., Koehnke J., Besing J. Combined effects of noise and reverberation on sound localization for listeners with normal hearing and bilateral cochlear implants. *American Journal of Audiology*. 2017. V. 26 (4). P. 519–530. https://doi.org/10.1044/2017_AJA-16-0101
- Zheng Y., Swanson J., Koehnke J., Guan J. Sound localization of listeners with normal hearing, impaired hearing, hearing aids, bone-anchored hearing instruments, and cochlear implants: a review. *American Journal of Audiology (AJA)*. 2022. V. 31 (3). P. 819–834. https://doi.org/10.1044/2022_AJA-22-00006