

УДК 534.76+534.771+612.85.016.6

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЛУХА ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИБЛИЖЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ЗВУКОВОГО ОБРАЗА В НОРМЕ И ПРИ СЕНСОНЕВРАЛЬНОЙ ТУГОУХОСТИ 1-Й СТЕПЕНИ

© 2020 г. И. Г. Андреева<sup>1</sup> \*, Е. А. Клишова<sup>2</sup>, А. П. Гвоздева<sup>1</sup>,  
В. М. Ситдииков<sup>1</sup>, Л. Е. Голованова<sup>2</sup>, Е. А. Огородникова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии  
имени И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФГБУЗ Городской гериатрический медико-социальный центр, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 10.12.2019 г.

После доработки 16.01.2020 г.

Принята к публикации 20.03.2020 г.

В условиях свободного звукового поля выполнена сравнительная оценка пространственной и временной разрешающей способности слуха для неподвижных и движущихся звуковых образов в норме (12 испытуемых) и при симметричной сенсоневральной тугоухости 1-ой степени (12 пациентов). Показано, что у пациентов с тугоухостью пространственная разрешающая способность при локализации неподвижных звуковых образов не изменена по сравнению с нормой слуха. При локализации движущихся звуковых источников их пороговые временные и пространственные показатели варьируют и могут, как совпадать с данными, полученными в группе испытуемых с нормальным слухом, так и отличаться от них в несколько раз. Одной из причин такой вариабельности может быть нарушение у пациентов с тугоухостью процессов временного слухового анализа. Выявленная корреляция дифференциальных порогов по длительности и по расстоянию при движении звукового образа указывает на разную степень вовлечения центральных отделов слуховой системы в патологический процесс на фоне одинаковой потери слуха.

**Ключевые слова:** пространственный слух, сенсоневральная тугоухость, пороги слуха, восприятие движения, оценка расстояния, пороги по длительности.

**DOI:** 10.31857/S0131164620040037

Сенсоневральная тугоухость (СНТ), обусловленная возрастными изменениями слуха, характеризуется симметричным повышением слуховых порогов на высоких частотах, что приводит к ограничению участия высокочастотного бинаурального механизма в локализации источников звука. Наряду с повышением порогов слышимости при сенсоневральной тугоухости возникает ряд других нарушений восприятия [1, 2]. Среди них и, так называемый, феномен усиленного нарастания громкости (ФУНГ), который состоит в сужении диапазона воспринимаемых интенсивностей звука, и нарушении функции компрессии, связывающей интенсивность звукового сигнала с его субъективной громкостью. Поскольку интенсивность звукового сигнала является одним из основных признаков для перцептивной оценки удаленности источника звука, проявления ФУНГ при сенсоневральной тугоухости могут влиять на определение слушателем расстояния до источни-

ка звука, а также на восприятие его приближения и удаления.

Нарушения локализации при снижении слуха изучены преимущественно в условиях расположения неподвижных источников звука или их движения в азимутальной плоскости [3–5]. Вместе с тем потеря слуха на высоких частотах, характерная для возрастного снижения слуха (пресбикузиса), приводит к нарушению обработки пространственной информации преимущественно в сагиттальной плоскости, поскольку спектральные признаки локализации по вертикали находятся в высокочастотной области [6]. Известно, что сходные по данным аудиометрии потери слуха могут приводить к разным нарушениям локализации [7]. Это обстоятельство связано с тем, что кохлеарные нарушения могут включать дисфункцию внутренних и наружных волосковых клеток, а также сопровождаться проявлениями дегенерации волокон слухового нерва, которые

отражаются в синхронизации и скорости генерации нервных импульсов в зависимости от уровня звука [8]. Следствием таких нарушений является ухудшение показателей локализации по вертикали [9], выраженность которого варьирует в широком диапазоне из-за различной степени поражения как рецепторного, так и нейронального компонентов слуха. По этим причинам изменения в оценке расстояния до источника звука при сенсоневральной тугоухости также могут иметь индивидуальные особенности.

Локализация источников звука по удаленности является наименее исследованной областью пространственного слуха, несмотря на ее большое значение с точки зрения обеспечения сигнальной функции и безопасности человека в окружающей среде [10, 11]. Влияние сенсоневральной потери слуха на величину порога различения по расстоянию для неподвижного источника звука было рассмотрено в единственном психоакустическом исследовании [12]. Это влияние было изучено с точки зрения эффективности признаков локализации — уровня звука и соотношения уровней прямого звука и реверберации, которое является признаком локализации источников в закрытых помещениях [11]. Исследование разрешающей способности слуха по расстоянию было выполнено при эталонных расстояниях 2 и 5 м в условиях: 1) изменения интенсивности звука с расстоянием, 2) выравнивания интенсивности звука в месте прослушивания [12]. В этой работе моделирование положения источника звука осуществляли оригинальным методом, который воссоздавал акустику помещения с заданными размерами и параметрами реверберации. Полученные при норме слуха дифференциальные пороги по расстоянию для источников речи составили около 25% как при изменении уровня звука, так и при выравненной интенсивности звукового сигнала. В группе с нарушением слуха (средняя потеря слуха 38 дБ — легкая степень тугоухости по международной классификации, прослушивание без слуховых аппаратов) пороги, относительно нормы при изменении уровня сигнала, увеличивались для эталонного расстояния 5 м. В случае выравненной интенсивности звука оценка расстояния носила случайный характер не только у пациентов с СНТ, но и у некоторых нормально слышащих испытуемых. Сопоставление данных этого исследования с результатами, полученными ранее для испытуемых с нормальным слухом при использовании реальных неподвижных источников звука, свидетельствовало о существенных различиях в значениях порогов по расстоянию. В последнем случае они были в 2–4 раза ниже [13]. Таким образом, моделирование изменения расстояния до источника звука и данные работы [12] относительно характеристик пространственного восприятия у пациентов с СНТ,

не могут рассматриваться в качестве полноценной замены измерениям в реальных условиях, в том числе, в условиях свободного поля.

Целью настоящего исследования была оценка пространственной и временной разрешающей способности слуха при локализации приближения и удаления источника широкополосного шума в норме и у пациентов с симметричной сенсоневральной тугоухостью 1-й (легкой) степени в условиях свободного поля. Для этого были использованы модели неподвижных и движущихся по радиальной координате источников звука. Расстояние от слушателя до моделируемого неподвижного источника звука (неподвижного звукового образа) определялось балансом уровней сигналов, подаваемых на громкоговорители, расположенные перед испытуемым на разном расстоянии. При моделировании приближения и удаления звукового образа, это соотношение закономерно менялось за счет монотонного изменения амплитуды звуковых сигналов на ближнем и дальнем громкоговорителях в обратной пропорции. Такое изменение соответствовало восприятию перемещения звукового образа между источниками звука в одну или другую сторону. Применение данной модели ранее показало результаты оценки дифференциальных порогов по расстоянию для движущихся звуковых образов у испытуемых с нормальным слухом [14], близкие к соответствующим порогам для реальных неподвижных источников звука [13]. Это позволило нам использовать ее в качестве основы для оценки изменений показателей пространственного слуха и у пациентов с СНТ.

## МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 12 пациентов (10 женщин и 2 мужчин в возрасте 45–80 лет) с симметричной СНТ первой степени (табл. 1) и 12 испытуемых (10 женщин и 2 мужчин в возрасте 22–56 лет) с нормальным слухом. Состояние слуха испытуемых обеих групп оценивали с помощью тональной пороговой аудиометрии. В анамнезе пациентов с СНТ отсутствовали острые нарушения мозгового кровообращения, черепно-мозговые травмы и острый инфаркт миокарда, т.е. заболевания, которые часто сопровождаются нарушением мозгового кровообращения и нарушениями со стороны центрального отдела слухового анализатора. Ни один из пациентов не пользовался слуховыми аппаратами, как при участии в эксперименте, так и в повседневной жизни.

Для оценки разрешающей способности принимали звуковые стимулы, которые представляли собой последовательности широкополосных шумовых посылок в диапазоне частот 0,2–8 кГц для обеих групп испытуемых. Длительность посылок

**Таблица 1.** Возраст и состояние слуха пациентов с СНТ

Номер пациента	Возраст, лет	Потеря слуха слева, дБ	Потеря слуха справа, дБ	Стаж тугоухости, лет
1	48	30	28	2
2	75	29	34	4
3	54	25	28	1
4	76	38	38	3
5	73	31	29	1
6	80	35	34	3
7	54	38	40	5
8	73	29	26	2
9	45	20	33	30
10	71	30	28	1
11	78	34	36	5
12	74	40	33	1
Среднее по группе	67	31	32	5

составляла 22 мс с линейными фронтами нарастания и убывания амплитуды по 4 мс. Пауза между посылками равнялась 3 мс. Соответственно ритм последовательностей был равен 40 Гц. Такие последовательности воспринимались испытуемыми как непрерывные звуковые сигналы.

Амплитудные характеристики стимулов и их длительность были разными в экспериментах, направленных на оценку пространственной разрешающей способности слуха при локализации движущихся и неподвижных звуковых образов, а также определение временных порогов слуховой локализации движения по радиальной координате.

При оценке пространственной разрешающей способности слуха по расстоянию для неподвижных звуковых образов в качестве стимулов применяли последовательности широкополосных шумовых посылок длительностью 1 с. Амплитуда посылок оставалась постоянной в течение всего времени звучания последовательности. Варьируя соотношение амплитуд посылок на ближнем и дальнем громкоговорителях, изменяли уровень звукового давления (УЗД) в месте прослушивания, создавая, таким образом, иллюзию источника звука, расположенного ближе к слушателю или дальше от него. УЗД в месте прослушивания варьировался в пределах от 60 до 65 дБ с шагом 0,5 дБ, что соответствовало 11 стимулам, различающимся по этому параметру. Стимулы предъявляли испытуемому парами. УЗД стимулов в паре различался на 1, 2, 3, 4 или 5 дБ что, согласно работе [15], позволяло моделировать смещение неподвижного источника звука вперед или назад относительно слушателя до 78%. В одной паре стимулов УЗД не различался, что соответствовало отсутствию изменения расстояния до источника

звука. Продолжительность паузы между стимулами в парах составляла 1 с. Испытуемого просили ответить на вопрос: “Ближе или дальше расположен источник второго звукового сигнала по сравнению с источником первого сигнала в паре?”, выбрав одну из кнопок на пульте с вариантом ответа “ближе” или “дальше”. В тех случаях, когда испытуемый не мог определить, ближе или дальше расположен источник второго сигнала, он должен был выбрать один из двух вариантов ответа (“ближе” или “дальше”) случайным образом. Следующую пару стимулов предъявляли только после того, как испытуемый давал ответ нажатием на кнопку. Для определения порога использовали адаптивную методику измерений “вверх-вниз”, согласно которой производили последовательное снижение или увеличение разницы УЗД в парах стимулов в зависимости от правильной или неправильной оценки испытуемым направления смещения звукового образа [16]. Разницу УЗД увеличивали после каждого неправильного ответа и снижали после каждого правильного ответа с шагом в 1 дБ. Порог определяли как среднее значение разницы УЗД в пяти точках разворота.

Оценку пространственной разрешающей способности слуха для движущихся источников звука выполняли с применением модели движения. Приближение и удаление звуковых образов моделировали линейным изменением амплитуды последовательностей широкополосных шумовых посылок, которые подавали с двух громкоговорителей [17]. Для создания иллюзии приближения источника звука амплитуду последовательности шумовых посылок увеличивали на ближнем и уменьшали на дальнем громкоговорителе. Для создания иллюзии удаления амплитуду последо-

вательности шумовых посылок меняли в противоположном направлении. Применяли 10 односекундных стимулов, изменение суммарного УЗД в месте прослушивания которых составляло от 1 до 5 дБ при шаге изменения 1 дБ, что позволяло моделировать непрерывное удаление и приближение звукового образа на 12, 26, 41, 58 и 70% [15]. Также был сформирован один неподвижный звуковой стимул продолжительностью 1 с, в котором УЗД в месте прослушивания не изменялся. Максимальный уровень звукового давления стимулов в месте прослушивания составлял  $65 \pm 2$  дБ. Испытуемого просили ответить на вопрос: “Приближается или удаляется звуковой образ?” и нажать на одну из кнопок на пульте, которые соответствовали ответам “приближается” и “удаляется”. Следующий стимул предъявляли испытуемому только после ответа на предыдущий. В ситуации, когда испытуемый затруднялся в определении направления движения, инструкция предписывала ему выбрать один из двух вариантов случайным образом. При определении порога по расстоянию для движущихся звуковых образов применяли адаптивную методику “вверх-вниз”, последовательно уменьшая или увеличивая перепад УЗД стимулов в зависимости от того, правильно или неправильно испытуемый оценивал направление движения звукового образа. Перепад УЗД увеличивали после каждого неправильного ответа и уменьшали после каждого правильного ответа с шагом в 1 дБ. Порог определяли как среднее значение перепада УЗД в пяти точках разворота. Затем усредненные значения перепада УЗД пересчитывали для определения изменения расстояния до источника звука в относительных величинах, применяя формулу из работы [15].

Для определения временных порогов слухового восприятия движения по радиальной координате приближение и удаление звуковых образов моделировали противонаправленным изменением амплитуды последовательностей шумовых посылок на ближнем и дальнем громкоговорителях. Для испытуемых с нормальным слухом разница максимальной и минимальной амплитуд в последовательностях была постоянной и составляла 38.6 дБ для сигнала, поступающего на ближний громкоговоритель, и 39.1 дБ для сигнала, поступающего на дальний громкоговоритель. Для пациентов с СНТ соответствующая разница максимальной и минимальной амплитуд составляла 20 дБ для сигналов, поступающих как на ближний, так и на дальний громкоговоритель. Эти различия отражали разницу в расстояниях до ближнего и дальнего громкоговорителей, которые применяли для испытуемых с нормальным слухом (1 и 4 м), для пациентов с СНТ (0.75 и 3 м), что позволяло формировать у испытуемых из обеих групп ощущение плавного, непрерывного движения звукового образа. Максимальный УЗД

стимулов в месте прослушивания составлял  $65 \pm 2$  дБ для всех условий обследования. Длительность стимулов варьировала от 100 до 1000 мс с шагом 100 мс. Процедура оценки порогов была аналогична той, которую применяли для определения пространственной разрешающей способности для движущихся источников звука.

Измерения с участием группы пациентов с СНТ проводили на базе медицинского учреждения в кабинете объемом 51 м куб. Для уменьшения реверберации использовали акустические звукопоглощающие панели типа “Пирамида-100” и ковровое покрытие. Характеристическое время реверберации RT60, измеренное в этом помещении методом прерываемого шума, составило 460 мс. Эксперименты с участием испытуемых с нормальным слухом проводили в звукоизолированной анэхоидной камере объемом 62.5 м куб., ослабление уровня наружных шумов в которой составляло не менее 40 дБ в диапазоне частот 0.5–16 кГц.

Предъявление звуковых стимулов в обеих группах испытуемых осуществляли с помощью двух динамических громкоговорителей, расположенных на разных расстояниях напротив испытуемого на уровне его головы. Для группы пациентов с СНТ двухполосные коаксиальные громкоговорители *Morel SoundSpot SP-1* (Израиль) располагали на расстояниях 0.75 и 3 м. Воспроизведение стимулов для группы пациентов с СНТ выполняли с помощью ноутбука *HP ProBook 450* (Китай) с внешней звуковой картой *Creative E-MU0202* (частота дискретизации 44100 Гц, 16 Бит) и двухканального усилителя мощности *ONKYO A-9377*. Для испытуемых с нормальным слухом применяли два коаксиальных двухполосных громкоговорителя *Klipsch R-3800C* (Китай), которые находились на расстояниях 1 и 4 м напротив слушателя. Звуковые стимулы в экспериментах с этой группой слушателей воспроизводили на ПК *MicroXperts* с внешним *USB*-аудиоинтерфейсом *AKAI EIE* (частота дискретизации 44100 Гц, 16 Бит), аналоговый сигнал с которого поступал на усилитель мощности *NevaAudio SA-3004* (Россия). Генерация и предъявление звуковых стимулов, а также запись ответов испытуемого происходила автоматически с применением оригинальной компьютерной программы. Акустические измерения проводили с использованием калиброванного комплекта акустической аппаратуры – микрофона 4145, предусилителя 2639 и усилителя 2606 (“Брюль и Кьер”, Дания).

После измерений проводили усреднение полученных индивидуальных значений дифференциальных порогов отдельно по группе испытуемых с нормальным слухом и группе пациентов с СНТ. Сравнение величин дифференциальных

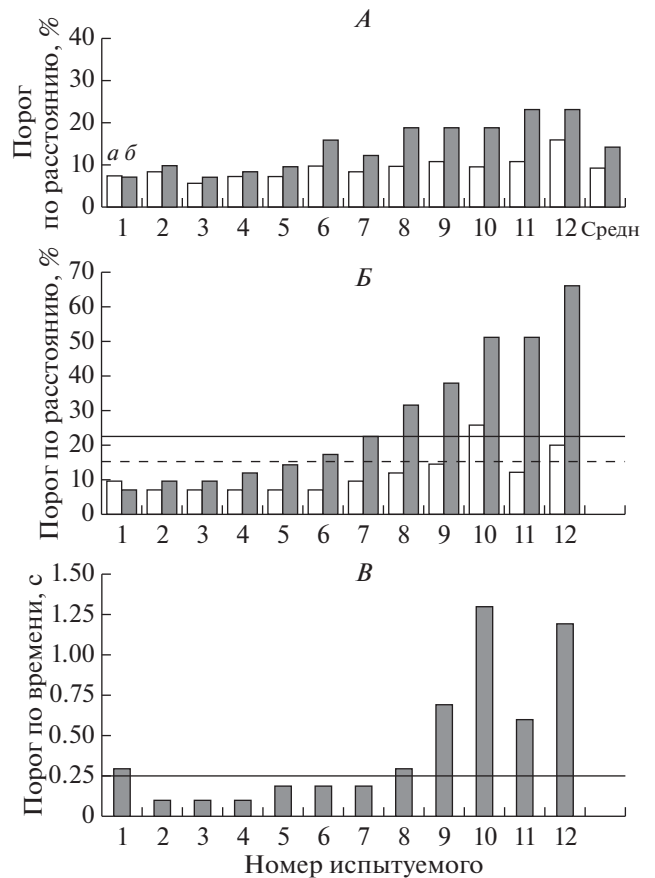
порогов по расстоянию для неподвижных и движущихся звуковых образов внутри групп испытуемых с нормальным слухом и пациентов с СНТ проводили с использованием непараметрического парного критерия Вилкоксона. Анализ данных выполняли методом линейной аппроксимации для оценки взаимосвязи изменений полученных показателей. Статистический анализ данных осуществляли в программе *STATISTICA*.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В проведенных экспериментах были определены пороги слухового восприятия неподвижных и движущихся по радиальной координате звуковых образов по расстоянию, а также оценены пороги слухового восприятия приближающихся и удаляющихся звуковых образов по времени в двух группах слушателей: испытуемых с нормальным слухом и пациентов с СНТ первой степени.

Испытуемые с нормальным слухом демонстрировали низкую внутригрупповую вариабельность величин всех трех порогов, особенно в отношении порога по расстоянию для неподвижных источников. Пороги по расстоянию для неподвижных источников звука составили в этой группе в среднем 9%, а минимальное и максимальное индивидуальные значения этого порога были равны 6 и 16%, соответственно (испытуемые 3 и 12, рис. 1, А). Пороги по расстоянию для движущихся источников звука у испытуемых с нормальным слухом составляли в среднем 14%. Минимальное и максимальное индивидуальные значения порога по расстоянию для движущихся источников в норме равнялись 7 и 23% (испытуемые 1, 3 и 12). Таким образом, внутригрупповая вариабельность величины порога для движущихся источников звука была больше, чем для неподвижных. Порог по времени у испытуемых с нормальным слухом составил в среднем 130 мс при внутригрупповой вариабельности 75–250 мс. Связь между величинами порогов по расстоянию и по длительности для движущихся звуковых образов в группе с нормой слуха не была обнаружена, поскольку линейный корреляционный анализ для этих показателей давал аппроксимацию с параметрами:  $y = 0.06x + 6.39$ ,  $R^2 = 0.25$ .

У пациентов с СНТ индивидуальные пороги по расстоянию для неподвижных источников варьировали в пределах от 7 до 26% (рис. 1, Б). Только у двух из 12 пациентов (№ 10 и 12) эти пороги оказались выше максимального значения данного порога в норме (16%) и были равны 26 и 20%, соответственно. У остальных десяти пациентов порог по расстоянию для неподвижных источников не превышал 16%. Индивидуальные значения порогов по расстоянию для движущихся источников варьировали в группе пациентов с СНТ от 7 до 66%. У пяти из них (№ 8, 9, 10, 11 и 12) вели-



**Рис. 1.** Пороговые показатели пространственной и временной разрешающей способности слуха при оценке изменения расстояния до источников звука. А – дифференциальные пороги по расстоянию у испытуемых с нормальным слухом, Б – дифференциальные пороги по расстоянию у пациентов с СНТ первой степени. По оси абсцисс – порядковый номер испытуемого/пациента, по оси ординат – величина индивидуального порога по расстоянию, %. а – порог для неподвижных звуковых образов, б – порог для движущихся звуковых образов. Сплошная горизонтальная линия показывает максимальную величину порога по расстоянию для неподвижных звуковых образов в группе испытуемых с нормальным слухом. Прерывистая горизонтальная линия – максимальная величина порога по расстоянию для неподвижных звуковых образов в группе испытуемых с нормальным слухом. В – дифференциальные пороги по времени при восприятии движущихся звуковых образов у пациентов с СНТ первой степени. По оси абсцисс – порядковый номер пациента, по оси ординат – величина индивидуального порога по времени, с. Сплошная горизонтальная линия соответствует максимальному порогу по времени в группе испытуемых с нормальным слухом.

чины этих порогов были выше, чем максимальное значение порога, полученное в группе с нормальным слухом. Значения данного порога составили для этих пациентов 32, 38, 51, 51 и 56%, соответственно. У оставшихся семи пациентов

порог по расстоянию для движущихся источников был не более 23%.

Пороги по времени в группе пациентов с СНТ значительно варьировали (рис. 1, *В*). Минимальное индивидуальное значение порога по времени составило 100 мс (пациенты № 2, 3 и 4), а максимальное – 1300 мс (пациент № 10). Шесть из 12 пациентов с СНТ имели пороги по времени, превышающие 250 мс – величину соответствующую максимальному индивидуальному порогу в норме. У пациентов № 1, 8, 9, 10, 11 и 12 пороги по времени составили 300, 300, 700, 1300, 600 и 1200 мс. У остальных шести пациентов порог по времени был меньше 250 мс.

В обеих группах слушателей у большинства испытуемых пороги по расстоянию для движущихся звуковых источников оказались выше, чем для неподвижных источников. Так, среди испытуемых с нормальным слухом, только у одного слушателя эти пороги были равны между собой (испытуемый № 1, значение порогов – 7%), а в группе с СНТ только у одного пациента порог по расстоянию для неподвижных источников незначительно превышал порог для движущихся (пациент № 1, 10 и 7% соответственно). Попарное сравнение индивидуальных значений порогов по расстоянию для неподвижных и движущихся источников внутри групп испытуемых подтвердило, что в обеих группах порог для движущихся источников был выше порога для неподвижных ( $p < 0.01$ , непараметрический парный критерий Вилкоксона). Соответствующие медианные значения составили для группы с нормальным слухом 9 и 14%, а для группы пациентов с СНТ – 10 и 20%.

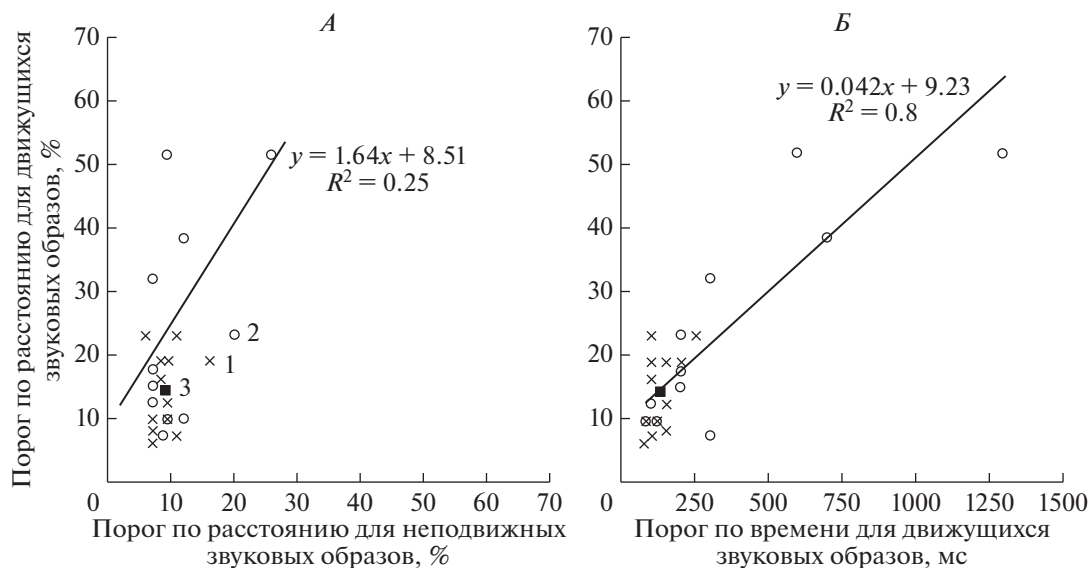
Таким образом, испытуемые с нормальным слухом и пациенты с СНТ первой степени обнаруживали однонаправленные изменения величин порогов по расстоянию при переходе от локализации неподвижных источников звука к локализации движущихся источников: пороги в обеих группах достоверно повышались. Испытуемые с нормальным слухом демонстрировали меньшие разбросы индивидуальных значений для всех типов сравниваемых порогов: для неподвижных источников по расстоянию, для движущихся источников по расстоянию и по времени. Вместе с тем, в группе испытуемых с СНТ стабильно низкие разбросы индивидуальных значений порогов наблюдались только для порогов неподвижных источников по расстоянию, тогда как пороги движущихся источников по расстоянию и по времени у них демонстрировали значительную индивидуальную вариабельность.

Сопоставление полученных индивидуальных данных с использованием функции линейной аппроксимации позволило продемонстрировать отсутствие корреляции между значениями порогов

по расстоянию при локализации движущихся и неподвижных звуковых образов (рис. 2, *А*). Вместе с тем была выявлена взаимосвязь индивидуальных порогов по длительности и по расстоянию для движущихся звуковых образов у пациентов с СНТ ( $R^2 = 0.8$ , рис. 2, *Б*). Можно отметить, что в группе испытуемых с нормой слуха проявления такой связи обнаружены не были, поскольку линейный корреляционный анализ для порогов по расстоянию и по длительности при движении звуковых образов давал аппроксимацию с  $R^2 = 0.25$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пространственная разрешающая способность при локализации неподвижного звукового образа по расстоянию в норме и при СНТ 1-й степени оказалась практически одинаковой. Только для двух пациентов величина порога превышала максимальные значения, полученные в группе с нормальным слухом. Минимальные значения в группе нормы слуха и при тугоухости совпадали. Таким образом, величина порогов по расстоянию в норме соответствовала полученным ранее данным для широкополосных источников звука [18]. При сенсоневральной тугоухости измерения порогов ранее выполняли только для речевых стимулов при средней потере слуха на 4-х октавных частотах 38 дБ, что всего на 6 дБ по средним данным хуже, чем в нашем исследовании [12]. Однако полученные результаты принципиально различались с нашими данными. Если пороги по расстоянию в настоящей работе практически совпадали с порогом при норме слуха, то данные работы [12] демонстрировали неспособность пациентов определить разницу в расстоянии речевых источников. По нашим представлениям причина различий результатов заключается в условиях предъявления сигнала, а не в разности спектрального состава сигналов и не в более выраженной потере слуха у пациентов с СНТ. В отличие от нашего исследования, которое было проведено в условиях свободного поля или близких к ним, работа *Akeroyd M.A. et al.* [12] выполнялась при подаче испытуемым звуковых стимулов в головные телефоны на основе предварительной записи. Такое предъявление сигналов исключает возможность сканирования пространства при помощи небольших движений головы и может приводить к ухудшению локализации [19]. В пользу этого предположения свидетельствуют данные порогов при нормальном слухе испытуемых из работы [12]. Они составили 25% вместо 10%, характерных для оценки порогов в условиях свободного поля. Таким образом, по нашим данным, полученным в условиях свободного поля, при СНТ 1-й степени пространственная разрешающая способность



**Рис 2.** Дифференциальные пороги при определении изменения расстояния до неподвижных и движущихся звуковых образов.

**А** – индивидуальные пороги по расстоянию для неподвижных и движущихся звуковых образов. По оси абсцисс – пороговые показатели для неподвижных образов, %, по оси ординат – пороговые показатели для движущихся образов, %. **Б** – индивидуальные пороги по времени и по расстоянию для оценки направления движения звуковых образов. По оси абсцисс – пороговые показатели для движущихся звуковых образов по времени, мс, по оси ординат – пороговые показатели для движущихся звуковых образов по расстоянию, %. 1 – данные для испытуемых с нормальным слухом ( $n = 12$ ), 2 – данные пациентов с СНТ ( $n = 12$ ), 3 – среднее значение в группе нормы. На графиках приведены функции линейной аппроксимации данных для группы пациентов с СНТ с указанием соответствующих коэффициентов корреляции.

при локализации неподвижного источника звука, как правило, не ухудшается.

Пороги по расстоянию в случае неподвижных источников звука могут быть оценены при парном сравнении стимулов, в то время как разрешающая способность для движущегося источника звука определяется по способности оценить направление его движения (приближения или удаления), т.е. способности сравнить положение начальной и конечной точки траектории. Оценка динамических изменений в сигнале предполагает способность к его временному анализу. Более половины пациентов с СНТ (7 из 12 чел.) имели пороги, не превышающие максимальные пороги для испытуемых с нормальным слухом. Среднее по группе повышение порогов у пациентов с СНТ составило 100% по сравнению с нормой, а по медианным значениям – 42%. Данный результат согласуется с результатами работы [19], в которой определяли абсолютный порог обнаружения движения по расстоянию при предъявлении в наушниках виртуального звукового образа, полученного на основе предварительной записи, как и в работе [12]. В этом исследовании использовали звук фонтана, близкий по спектральному составу к стимулам, применявшимся в настоящем исследовании. Для пациентов с легкой (соответствует 1–2-й степени) и умеренной СНТ порог был в

среднем на 25% выше, чем у испытуемых с нормальным слухом. Таким образом, в обоих случаях пациенты с СНТ демонстрировали ухудшение пространственных показателей локализации источников звука, движущихся по радиальной координате, по сравнению с нормой слуха. Вместе с тем, в условиях свободного поля это ухудшение было выражено сильнее (42%), чем в упомянутом исследовании (25%), что могло быть связано с разной продолжительностью стимуляции. Длительность стимулов в нашей работе составляла 1 с, тогда как в работе [19] она равнялась 2.3 с. Согласно данным настоящего исследования, некоторым пациентам с СНТ (пациенты № 10 и 12) было недостаточно длительности 1 с для того, чтобы определить приближается источник звука или удаляется. У этих же пациентов пороги по расстоянию для движущихся звуковых источников были самыми высокими в группе (51 и 66% соответственно) и вносили существенный вклад в повышение среднего по группе порога. Таким образом, наблюдавшееся нами в группе с СНТ значительное ухудшение пространственной разрешающей способности по расстоянию для движущихся звуковых образов могло быть связано с существенным дефицитом временного слухового анализа у части пациентов.

Измерение порогов по длительности для оценки направления движения источников по радиальной координате предполагает участие временных механизмов слуха и выполнение задачи ориентации в условиях дефицита времени. Пороги по длительности в группе с нормальным слухом варьировали в такой же степени, как и порог по расстоянию для движущихся источников, минимальные и максимальные значения различались в три раза. При 1-й степени СНТ размах величины порогов по длительности был существенно больше — в 13 раз. Вместе с тем, только у шести пациентов с СНТ (половины группы) был превышен максимальный порог, измеренный при норме слуха. Эти данные указывают на то, что оценка потери тонального слуха сама по себе недостаточна для характеристики состояния слуха пациента при возрастном снижении слуха (пресбикузисе).

В пожилом возрасте наблюдается снижение слуховой функций, которое на начальной стадии выражается в повышении порогов слышимости в высокочастотной области, а также в изменении надпорогового кодирования — феномене усиленного нарастания громкости [2, 20]. Оба явления возникают как результат дегенерации улитки или сопутствующих структур внутреннего уха, а также, на более поздних стадиях, проводящих структур и центральных отделов слуховой системы [20–22]. Возможной причиной повышения обоих порогов восприятия движущихся звуковых образов является вовлечение в патологический процесс центральных отделов слуховой системы. Известно, что центральные нарушения слуха связаны с нарушением процессов временного анализа [23, 24], которое может проявляться без выраженного снижения чувствительности (повышения порогов слышимости), например, в ухудшении показателей обнаружения паузы и различения быстрых ритмических последовательностей на начальном этапе возрастных изменений слуха [25]. Центральные нарушения слуха могут также затрагивать процессы бинаурального взаимодействия и амплитудной адаптации [22, 23, 26], которые вносят важный вклад в перцептивную оценку характеристик движения звуковых образов. Выявленная нами корреляция показателей пространственного слуха — порогов по расстоянию и по длительности, может свидетельствовать о разной степени вовлечения центральных отделов слуховой системы в патологический процесс на фоне одинаковой потери тонального слуха. Данная гипотеза и соотношение выделенных факторов требуют дальнейшей экспериментальной проверки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволили выполнить сравнительную оценку диф-

ференциальных порогов по расстоянию и порогов по времени при восприятии неподвижных и движущихся по радиальной координате звуковых образов у испытуемых с нормой слуха и с легкой (первой) степенью тугоухости. Было показано, что в обеих группах величины дифференциальных порогов при восприятии движущихся звуковых образов превышают аналогичные показатели, полученные для неподвижных источников. Величины внутригруппового разброса находятся в такой же зависимости, что особенно выражено у пациентов с СНТ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что помимо изменений в анализе интенсивности сигналов, связанном с процессами снижения слуховой чувствительности, у 42% испытуемых с легкой степенью СНТ проявляются нарушения при восприятии динамически изменяющихся сигналов — движущихся звуковых образов.

Данные представляют основу для дальнейшего исследования особенностей пространственного восприятия у пациентов с тугоухостью разной степени и выявления центральных слуховых расстройств, что имеет важное практическое значение для аудиологии.

**Этические нормы.** Исследование проведено в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным комитетом по биоэтике Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН (Санкт-Петербург).

**Информированное согласие.** Все испытуемые, принявшие участие в исследовании, предоставили добровольное письменное информированное согласие на участие в психоакустическом эксперименте, подписанное ими после разъяснения потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

**Финансирование работы.** Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № АААА-А18-118013090245-6) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-015-00296).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore B.C. An introduction to the psychology of hearing. England: Emerald, 2012. 441 p.
2. Таварткиладзе Г.А. Руководство по клинической аудиологии. М.: Медицина, 2013. 676 с.
3. Keating P., King A.J. Developmental plasticity of spatial hearing following asymmetric hearing loss: Context-dependent cue integration and its clinical implications // Front. Sys. Neurosci. 2013. V. 7. P. 123.



4. 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. ISAAR Special Issue. P. 1.
5. Lundbeck M., Grimm G., Hohmann V. et al. Sensitivity to Angular and Radial Source Movements as a Function of Acoustic Complexity in Normal and Impaired Hearing // Trends Hear. 2017. V. 21. P. 1.
6. Otte R.J., Agterberg M.J.H., Wanrooij M.M.V. et al. 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.
7. Noble W., Byrne D., Lepage B. Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment // J. Acoust. Soc. Am. 1994. V. 95. № 2. P. 992.
8. Reiss L.A., Ramachandran R., May B.J. Effects of signal level and background noise on spectral representations in the auditory nerve of the domestic cat // J. Assoc. Res. Otolaryngol. 2011. V. 12. № 1. P. 71.
9. Macpherson E.A., Sabin A.T. Vertical-plane sound localization with distorted spectral cues // Hear. Res. 2013. V. 306. P. 76.
10. Ahveninen J., Kopčo N., Jääskeläinen I.P. Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans // Hear. Res. 2014. V. 307. P. 86.
11. Kolarik A.J., Moore B.C., Zahorik P. et al. 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.
12. Akeroyd M.A., Gatehouse S., Blaschke J. et al. The detection of differences in the cues to distance by elderly hearing-impaired listeners // J. Acoust. Soc. Am. 2007. V. 121. № 2. P. 1077.
13. Kolarik A.J., Moore B.C.J., Zahorik P. et al. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss // Atten. Percept. Psychophys. 2015. V. 78. № 2. P. 373.
14. Андреева И.Г., Бахтина А.В., Гвоздева А.П. Разрешающая способность слуха человека по расстоянию при приближении и удалении звуковых образов разного спектрального состава // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 4. С. 468.
15. Coleman P.D. An analysis of cues to auditory depth perception in free space // Psychol. Bull. 1963. V. 60. № 3. P. 302.
16. Karmali F., Chaudhuri S.E., Yongwoo Yi. et al. Determining thresholds using adaptive procedures and psychometric fits: evaluating efficiency using theory, simulations, and human experiments // Exp. Brain Res. 2015. V. 234. № 3. P. 773.
17. 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.
18. Strybel T.Z., Perrott D.R. Discrimination of relative distance in the auditory modality: The success and failure of the loudness discrimination hypothesis // J. Acoust. Soc. Am. 1984. V. 76. № 1. P. 318.
19. Perrott D.R., Ambarsoom H., Tucker J. Changes in head position as a measure of auditory localization performance: Auditory psychomotor coordination under monaural and binaural listening conditions // J. Acoust. Soc. Am. 1987. V. 82. № 5. P. 1637.
20. Tyler R.S., Pienkowski M., Roncancio E.R. et al. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations // Am. J. Audiol. 2014. V. 23. № 4. P. 402.
21. Pienkowski M., Tyler R.S., Roncancio E.R. et al. A Review of Hyperacusis and Future Directions: Part II. Measurement, Mechanisms, and Treatment // Am. J. Audiol. 2014. V. 23. № 4. P. 420.
22. Бобошко М.Ю., Гарбарук Е.С., Жилинская Е.В., Салахбеков М.А. Центральные слуховые расстройства // Рос. оториноларингология. 2014. № 5. С. 87.
23. Musiek F.E., Chermak G.D. Handbook of central auditory processing disorder. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 2nd edition. San Diego: Plural Publishing, 2014. 745 p.
24. Бобошко М.Ю., Гарбарук Е.С., Жилинская Е.В., Абуджамеа А.Х. Временная разрешающая способность слуховой системы при сенсоневральной тугоухости // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 3. С. 10.
25. Бобошко М.Ю., Жилинская Е.В., Огородникова Е.А. и др. Анализ временных параметров звуковых сигналов в норме и при нарушениях слуха // Folia Otolaryng. Path. Resp. 2015. Т. 21. № 4. С. 47.
26. Dorman M.F., Loïsel L.H., Cook S.J. et al. Sound source localization by normal-hearing listeners, hearing-impaired listeners and cochlear implant listeners // Audiol. Neurotol. 2016. V. 21. № 3. P. 127.

## Auditory Resolution for Localization of an Approaching and Receding Sound Image in Normally Hearing Subjects and in Patients with Mild Sensorineural Hearing Loss

I. G. Andreeva<sup>a,\*</sup>, E. A. Klishova<sup>b</sup>, A. P. Gvozdeva<sup>a</sup>, V. M. Sitdikov<sup>a</sup>,  
L. E. Golovanova<sup>b</sup>, E. A. Ogorodnikova<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>b</sup>Municipal Geriatric Medical and Social Center, St. Petersburg, Russia

<sup>c</sup>Pavlov Institute of Physiology RAS, St. Petersburg, Russia

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

Comparative assessment of the spatial and temporal resolution of hearing for stationary and moving sound images was performed in free field for 12 normal-hearing listeners and 12 patients with symmetric mild sen-

sorineural hearing loss. It has been shown that spatial resolution in patients with hearing loss did not change for stationary sound images localization, while the temporal and spatial thresholds of moving sound source localization varied. These thresholds could coincide with the data obtained for the group of normally hearing subjects as well as could be several times higher. One of the reasons for such variability may be temporal auditory analysis impairment. The correlation of characteristics of moving sound image perception revealed in patients with hearing loss indicates different degrees of central auditory system impairment in patients with the similar tonal audiograms.

*Keywords:* spatial hearing, hearing loss, threshold of hearing, auditory movement perception, distance perception, temporal resolution.