

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА,  
ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО АЗИМУТУ, У ПАЦИЕНТОВ С ЛЕГКОЙ  
И УМЕРЕННОЙ СЕНСОНЕВРАЛЬНОЙ ТУГОУХОСТЬЮ**

© 2021 г. Е. А. Клишова<sup>1</sup>, А. П. Гвоздева<sup>1</sup> \*, Л. Е. Голованова<sup>2</sup>, И. Г. Андреева<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова,  
Санкт-Петербург, Россия*

\*E-mail: kukumalu@mail.ru

Поступила в редакцию 17.09.2021 г.

После доработки 04.10.2021 г.

Принята к публикации 05.10.2021 г.

Работа посвящена изучению временных характеристик слуховой локализации движения у пациентов с сенсоневральной тугоухостью (СНТ). Выполнена оценка порогов по времени, необходимому для определения направления движения по азимуту (ПВА). В исследовании приняли участие 15 пациентов с легкой и 16 пациентов с умеренной СНТ. Иллюзию движения источника звука в свободном поле создавали противонаправленным изменением амплитуды последовательностей шумовых посылок (0.2–8 кГц) на двух динамических громкоговорителях, расположенных слева и справа от пациента под углами 30°. Для оценки ПВА применяли адаптивную психоакустическую процедуру “один вверх—один вниз” с двухальтернативным вынужденным выбором. Индивидуальные значения ПВА в обеих группах варьировали в пределах 0.1–1.2 с. Медианные значения ПВА составили 0.3 с при легкой СНТ и 0.4 с при умеренной СНТ, ПВА в группах достоверно не различались, однако в 3–4 раза превышали соответствующее значение в норме – 0.1 с. Линейный корреляционный анализ показал, что у пациентов с легкой СНТ увеличение ПАВ ассоциировалось с величиной потери слуха. В группе пациентов с умеренной СНТ была выявлена прямая связь повышения ПАВ с продолжительностью заболевания и асимметрией порогов слуха между левым и правым ухом, которая не превышала 9 дБ. Сопоставление ПАВ у пациентов с жалобами на ушной шум и без него показало, что этот симптом значительно влияет на ПАВ в группе с умеренной, но не с легкой СНТ. Полученные данные свидетельствуют о том, что ухудшение временных характеристик слуховой локализации движения при СНТ связано не столько с повышением порогов слуха, но может быть обусловлено уменьшением динамического диапазона слуха на высоких частотах и вовлечением центральных отделов слухового анализатора в патологический процесс вследствие их недостаточной афферентной стимуляции.

*Ключевые слова:* сенсоневральная тугоухость, пространственный слух, локализация движущегося источника звука, азимутальное движение, временные характеристики слуха

DOI: 10.31857/S0869813921120049

Нарушение способности ориентироваться в пространстве по слуху существенным образом влияет на поведение человека, меняя характеристики вертикальной

позы [1], походки [2], и, по-видимому, способность быстро реагировать на движение объектов окружающего мира. Наиболее распространенное социально-значимое нарушение слуха, при котором наблюдается ухудшение способности к ориентации по слуху – это пресбиакузис. Пресбиакузисом называют прогрессирующую необратимую двустороннюю и преимущественно симметричную сенсоневральную потерю слуха (сенсоневральную тугоухость, СНТ), которая возникает при старении организма и вызвана дегенерацией улитки или сопутствующих структур внутреннего уха, слуховых нервов, с возможным вовлечением структур центрального отдела слухового анализатора [3]. После 65-ти лет эти изменения наблюдаются у 30% людей, а после 75-ти лет – у каждого второго [4].

В настоящее время интенсивно исследуются вопросы, связанные с нарушением локализации звука при патологии слуха, и возможности компенсации этой функции при слухопротезировании [5, 6]. Согласно данным мировой литературы, по результатам обследования стандартными аудиологическими методами и установленному диагнозу определить степень утраты пространственного слуха не представляется возможным [7, 8]. На сегодняшний день разработано большое число экспериментальных методик и выполнены десятки исследований, в которых для пациентов с различными нарушениями слуха проведена оценка пространственной разрешающей способности слуха [8–10], точности локализации [11], бинаурального освобождения от маскировки и разборчивости речи при пространственном разделении источников целевого речевого сигнала и шума [12]. Однако такой важный для безопасности жизнедеятельности показатель пространственного слуха, как минимальное время звучания, необходимое для оценки направления движения источника, оказывается практически не изученным. Вместе с тем, данный показатель в значительной степени определяет возможность своевременно отреагировать на опасные движущиеся объекты.

При локализации по азимуту высокочастотный бинауральный механизм слуха оказывается минимально задействован в сравнении с низкочастотным бинауральным механизмом, т.к. пациент недослышивает высокочастотную часть спектра. В случае возрастной СНТ наряду с повышением (ухудшением) порогов слуха происходит изменение кодирования надпороговых сигналов, причем, преимущественно на высоких частотах [3]. Это означает, что и моноуральный механизм локализации, основанный на оценке спектрального профиля сигнала (соотношении амплитуд разных составляющих спектра), при пресбиакузисе работает не так, как в норме. При пресбиакузисе с течением заболевания нередко возникают центральные нарушения слуха, которые приводят к ухудшению временного слухового анализа, что критично для локализации движущихся источников. Эти механизмы обеспечивают анализ изменений локализационных признаков, которые определяются динамическими параметрами звука при движении источника.

Таким образом, не менее трех различных причин могут вызывать изменения в восприятии движения источников звука и приводить к увеличению продолжительности его звучания, необходимой для определения направления движения. Поэтому величина данного показателя не может быть предсказана ни на основе стандартных аудиологических обследований, ни при использовании существующих экспериментальных методов локализации неподвижных источников звука. Изменение данного временного показателя при разной степени СНТ существенно с точки зрения понимания вклада каждого из перечисленных выше механизмов слухового анализа. Целью настоящей работы было определить время, необходимое для оценки направления движения в горизонтальной плоскости в группах пациентов с легкой и умеренной СНТ. Полученные результаты позволяют выполнить сравнительный анализ временных показателей по азимуту с соответствующими

показателями, полученными ранее для движения по радиальной координате (приближение—удаление).

В настоящей работе применялась модель движения источника звука в условиях свободного поля. Эта модель является более предпочтительной, чем применение передаточных функций для создания виртуальной акустической среды, поскольку имеет более высокую точность воспроизведения акустического пространства [13] и позволяет испытуемому совершать небольшие сканирующие движения головой, которые присутствуют в реальных условиях прослушивания и значительно улучшают показатели локализации [14]. Применение данной модели для оценки временных характеристик восприятия движения звуковых образов по азимутальной координате у испытуемых с нормальным слухом ранее показало результаты [13], близкие к соответствующим порогам для реальных источников звука [15]. Это позволило нам использовать данную модель для оценки показателей пространственного слуха у пациентов. При оценке времени, необходимого пациенту для определения направления движения источника по азимуту, была использована адаптивная психоакустическая процедура, подробно описанная в работе [13], т.к. она существенно сокращает время обследования, позволяет избежать утомления пациентов и провести оценку порогов в рамках врачебного приема.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В обследовании принял участие 31 взрослый пациент с диагностированной симметричной сенсоневральной тугоухостью. Пациенты были разделены на две группы по степени снижения слуха. В первую группу вошли 15 человек (3 мужчин, 12 женщин) с легкой СНТ по классификации ВОЗ – средний порог слуха на частотах 0.5, 1, 2 и 4 кГц для них находился в диапазоне от 25 до 40 дБ. Во второй группе было 16 пациентов (6 мужчин, 10 женщин) с умеренной СНТ, что соответствует среднему порогу слуха от 41 до 55 дБ. Информация о возрасте, продолжительности снижения слуха и средних слуховых порогах на четырех октавных частотах для левого и правого уха каждого пациента приведены в табл. 1 и 2. Разница в величине средних порогов слуха для левого и правого уха не превышала в группе с легкой СНТ 5 дБ, а в группе с умеренной СНТ – 9 дБ. Некоторые испытуемые страдали от ушного шума, такие случаи отмечены в таблицах. Все процедуры, выполненные в данном исследовании с участием людей, соответствуют этическим стандартам Национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из пациентов было получено информированное добровольное согласие на участие в обследовании.

Обследование проводили в условиях врачебного кабинета объемом 51 м<sup>3</sup> на базе Сурдологического отделения Городского гериатрического медико-социального центра. Для снижения реверберации в помещении применяли звукопоглощающие панели, ковровое покрытие, а также плотные шторы. Характеристическое время реверберации (RT60), в течение которого уровень прерванного широкополосного звукового сигнала в помещении снижался на 60 дБ, составляло 460 мс. Акустические измерения выполняли с использованием комплекта калиброванного оборудования фирмы Brüel & Kjær (Дания), который включал микрофон 4145, предусилитель 2639 и усилитель 2606.

Звуковые сигналы, применявшиеся для моделирования движения источника звука в горизонтальной плоскости, представляли собой серии шумовых посылок трапециевидной формы в диапазоне частот 0.2–8.0 кГц. Длительность каждой посылки составляла 22 мс с учетом линейных фронтов нарастания и убывания амплитуды по 4 мс. Пауза между посылками равнялась 3 с. Длительность сигналов за-

**Таблица 1.** Индивидуальные данные пациентов из группы легкой СНТ

№ пациента	Возраст, лет	Продолжительность СНТ, лет	Порог слуха, дБ		Δ , дБ ***
			Слева	Справа	
1 <sup>#</sup>	55	2	35	30	5
2	57	5	25	29	4
3 <sup>#</sup>	59	2	38	39	1
4 <sup>#</sup>	59	2	40	39	1
5 <sup>#</sup>	59	10	30	33	3
6	62	2	40	35	5
7	65	1	34	38	4
8	66	5	29	28	1
9 <sup>#</sup>	67	5	39	40	1
10 <sup>#</sup>	73	2	40	40	0
11	73	5	40	40	0
12	79	2	26	30	4
13	79	2	29	26	3
14	80	1	34	38	4
15	83	1	30	30	0
Среднее	68 ± 9*	2**	34 ± 5	34 ± 5	3

<sup>#</sup> Пациенты с ушным шумом в анамнезе;

\* указано стандартное отклонение;

\*\* для продолжительности СНТ приведено медианное значение;

\*\*\* абсолютное значение разности порогов для левого и правого уха (асимметрия слуха).

висела от количества посылок и могла составлять 0.075, 0.1, 0.2, ..., 1.5 с. Амплитуда посылок на протяжении звучания сигнала могла изменяться двумя способами: линейно увеличиваться на 10 дБ или уменьшаться на такую же величину. Генерация звуковых стимулов осуществлялась в режиме реального времени на ноутбуке HP ProBook 450 (Китай) с внешней звуковой картой Creative E-MU0202 (44 100 Гц, 16 Бит; Сингапур). Аналоговый сигнал со звуковой карты поступал на усилитель мощности ONKYO A-9377 (Япония), а затем на два динамических коаксиальных громкоговорителя Morel SoundSpot SP-1 (Израиль).

Иллюзию движения источника звука по азимутальной координате создавали, применяя модель движения в свободном поле, основанную на эффекте предшествования [16]. Для этого пару громкоговорителей располагали симметрично слева и справа от пациента на уровне его головы на расстоянии 1 м таким образом, что их акустические оси были расположены под углом 90° к междушумной оси пациента. Расстояние между громкоговорителями также составляло 1 м. Углы между сагиттальной осью пациента и прямыми, соединяющим центр его междушумной оси с каждым из громкоговорителей, были равны 30°. Таким образом, пациент и два громкоговорителя находились в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны 1 м. Моделирование движения источника от центра вправо выполняли, повышая уровень звукового давления (УЗД) шумовых посылок в месте прослушивания от 50 до 60 дБ на правом громкоговорителе и одновременно снижая его от 50 до 40 дБ на левом. Иллюзия движения источника от центра влево создавалась сходным образом: при этом УЗД увеличивался от 50 до 60 дБ на левом громкоговорителе и уменьшался от 50 до 40 дБ на правом. Для моделирования движения к центру справа или слева УЗД посылок изменялся в противоположных направлениях. Та-

**Таблица 2.** Индивидуальные данные пациентов из группы умеренной СНТ

№ пациента	Возраст, лет	Продолжительность СНТ, лет	Порог слуха, дБ		Δ , дБ ***
			Слева	Справа	
1 <sup>#</sup>	58	6	53	44	9
2	67	2	49	48	1
3	69	3	44	49	5
4	70	2	54	53	1
5	70	5	49	48	1
6 <sup>#</sup>	72	1	49	48	1
7 <sup>#</sup>	74	15	46	46	0
8	78	6	45	46	1
9	79	2	49	50	1
10	80	10	54	51	3
11 <sup>#</sup>	82	5	39	48	9
12	82	10	50	53	3
13	83	10	51	54	3
14	83	5	45	44	1
15	83	2	49	49	0
16	85	2	53	53	0
Среднее	76 ± 8*	5**	49 ± 4	49 ± 3	2

<sup>#</sup> Пациенты с ушным шумом в анамнезе;

\* указано стандартное отклонение;

\*\* для продолжительности СНТ приведено медианное значение;

\*\*\* абсолютное значение разности порогов для левого и правого уха (асимметрия слуха).

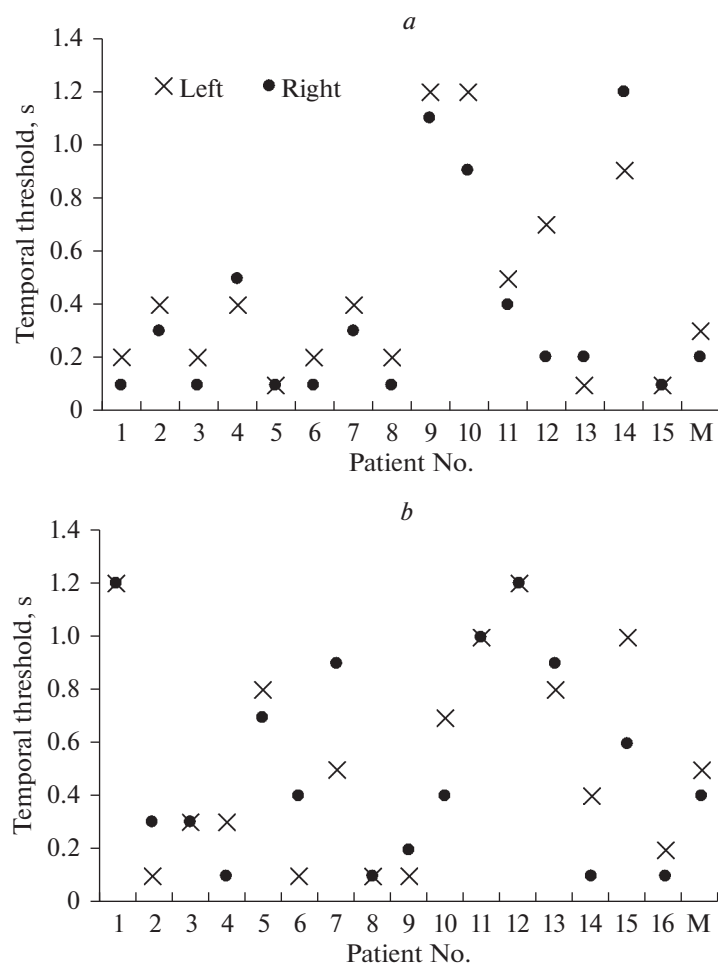
ким образом, различия УЗД, создаваемых громкоговорителями в начале и в конце звучания каждого стимула, составляли 0 и 20 дБ соответственно для движения из центра, и 20 и 0 дБ соответственно для движения к центру. Максимальный уровень звукового давления стимулов в месте прослушивания при их одновременном предъявлении с двух громкоговорителей составлял  $60 \pm 2$  дБ. Для расчета начальной и конечной точки траектории движения применяли формулу из классической работы Ваггера, связывающую взаимное расположение громкоговорителей и соотношение УЗД, создаваемых левым и правым динамиком в месте прослушивания, с воспринимаемым положением звукового образа [17]. Согласно расчету, начальные и конечные точки траектории движения звуковых образов, применяемых в нашей работе, находились на дуге окружности радиусом 1 м с центром в середине междушумной оси слушателя, в положениях  $\pm 24.1^\circ$  и  $0^\circ$ . Звуковые образы, двигавшиеся от центра влево или вправо, начинали движение из положения  $0^\circ$  и заканчивали его в положениях  $-24.1^\circ$  и  $+24.1^\circ$  соответственно. При движении справа или слева к центру движение начиналось из положений  $+24.1^\circ$  и  $-24.1^\circ$  и заканчивалось в точке  $0^\circ$ . Следовательно, звуковые образы, применявшиеся в нашей работе, всегда двигались по дуге длиной  $24.1^\circ$ . Подробный расчет начальных и конечных точек траектории движения звуковых образов приведен в нашей предыдущей работе [18]. Поскольку длительность стимулов варьировала от 0.075 до 1.5 с при фиксированной длине траектории, скорость движения звуковых образов также различалась и составляла от 16 до  $321^\circ/\text{с}$ .

Во время исследования пациенты сидели в кресле с подлокотниками и подголовником и видели громкоговорители. Для ответов испытуемого использовали пульт с двумя крупными кнопками и регулятором типа “колесико”. Перед началом эксперимента определяли индивидуальный баланс уровней звука между громкоговорителями, который позволял сформировать у пациента неподвижный звуковой образ, расположенный в точке, соответствующей  $0^\circ$  азимута. Для этого пациенту с пары громкоговорителей предъявляли непрерывный шумовой сигнал, соответствующий по спектру стимулам, для которых впоследствии определяли порог по времени (0.2–8 кГц). Пациент самостоятельно выставлял баланс, используя регулятор на экспериментальном пульте так, чтобы громкость слева и справа была одинаковой. Шаг регулировки баланса составлял 0.5 дБ. Полученное значение баланса фиксировали и далее применяли в качестве исходного значения, относительно которого изменялась амплитуда стимулов. Такой подход давал возможность снизить влияние на результаты обследования асимметрии слуха менее 5 дБ, которую невозможно обнаружить, используя стандартную тональную пороговую аудиометрию. Перед началом эксперимента каждому пациенту предъявляли несколько стимулов, чтобы убедиться, что он их хорошо слышит.

Оценку порогов по времени для определения направления движения по азимуту (ПВА) выполняли при помощи адаптивной психоакустической методики “один вверх—один вниз”. Применимость этой методики для скрининговой оценки временной и пространственной разрешающей способности слуха в условиях клиники была доказана нами в статье [13]. Отметим, что в настоящей работе измерение порога выполняли до достижения пяти точек разворота — ситуаций, когда пациент давал неправильный ответ после правильного или правильный после неправильного. ПВА определяли как среднее значение длительности стимула в четырех последних точках разворота. При малом числе точек разворота порог, как правило, переоценивается, т.е. оказывается выше, чем при использовании большего числа точек разворота — способе предпочтительном для точной оценки порогов [19]. Применение методики “один вверх—один вниз” позволило скомпенсировать влияние малого количества точек разворота на величину определяемого порога.

ПВА оценивали отдельно в левой и в правой полуплоскостях, т.е. для каждого пациента были измерены два значения ПВА. Порядок измерения порогов был случайным: для одних пациентов первым оценивали порог в левой полуплоскости, для других — в правой. Процедура измерения ПВА была одинакова в обеих полуплоскостях и состояла в следующем. В начале пациенту предъявляли стимул длительностью 1.0 с, случайным образом выбирая направление его движения: от центра или к центру в соответствующей полуплоскости. Прослушав сигнал, пациент должен был ответить на вопрос: “вправо или влево движется источник звука?”, нажав на соответствующую кнопку на пульте. Если направление движения было определено правильно, то следующим предъявляли более короткий стимул, при неправильном ответе длительность стимула увеличивали. Затем процедуру повторяли для другой полуплоскости.

Статистическую обработку полученных данных выполняли с применением методов непараметрической статистики. Парный метод Вилкоксона использовали для сравнения значений ПВА в левой и правой полуплоскостях внутри групп пациентов. Критерий Манна—Уитни для независимых выборок применяли для оценки различий порогов между группами пациентов, в том числе для их сравнения с данными, полученными нами ранее для группы испытуемых с нормальным слухом и пациентов с умеренно-тяжелой СНТ. В случае сравнения более чем двух групп вносили поправку Бонферрони.



**Рис. 1.** Индивидуальные пороги по времени для оценки направления движения звукового образа по азимутальной координате пациентами с СНТ в левой и правой полуплоскостях. (а) – данные пациентов с легкой СНТ. (б) – данные пациентов с умеренной СНТ. На легенде приведены обозначения для порогов в левой и правой полуплоскости. Каждый маркер отражает результат однократного измерения порога адаптивным методом “один вверх–один вниз”. Буквой М обозначены медианные пороги по группе отдельно в левой и правой полуплоскостях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ПВА были определены в левой и правой полуплоскостях у пациентов с легкой и умеренной СНТ. Индивидуальные и медианные по группам значения этих порогов представлены на рис. 1. Обе группы характеризовались большим межиндивидуальным разбросом пороговых значений: минимальный ПВА составил 0.1 с, а максимальный – 1.2 с. Вместе с тем, у одного и того же пациента ПВА в левой и правой полуплоскостях не различались более чем на 0.3 с в большинстве случаев. Исключение составили три пациента из 31 обследованного. В группе с легкой степенью СНТ для пациента № 12 в левой и правой полуплоскостях ПВА составил 0.7 и 0.2 с соответственно, разница порогов была равна 0.5 с. В группе с умеренной СНТ двое

пациентов №№ 7 и 15 показали разницу в ПВА для левой и правой полуплоскостей 0.4 с.

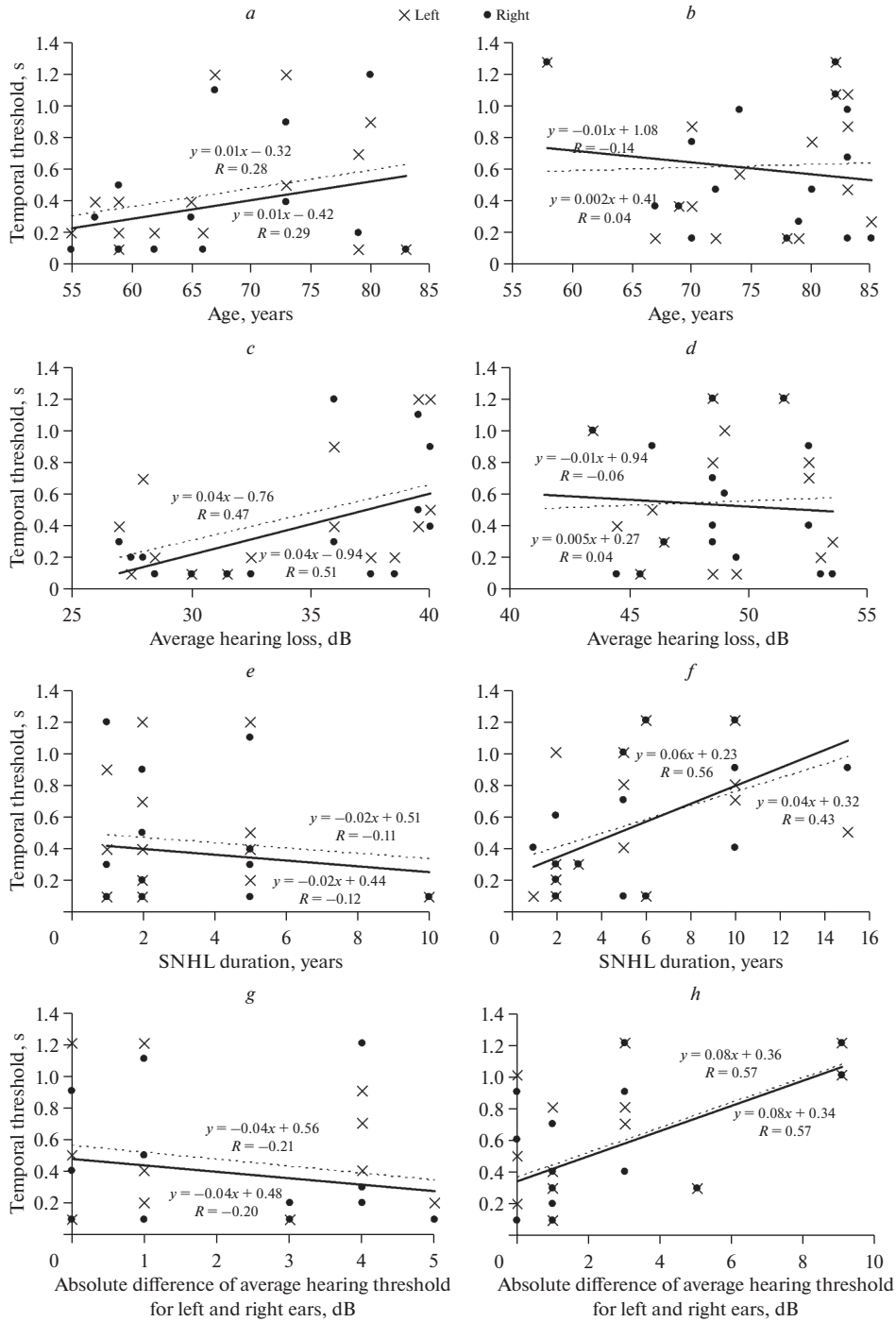
Медианные значения порогов в левой и правой полуплоскостях составили 0.3 и 0.2 с для пациентов с легкой СНТ, и 0.5 и 0.4 с для пациентов с умеренной СНТ соответственно (рис. 1). Сравнение величин ПВА в левой и правой полуплоскостях при помощи непараметрического парного критерия Вилкоксона не выявило между ними достоверных различий для обеих групп пациентов ( $p = 0.11$ , N-ties = 13 для группы с легкой СНТ;  $p = 0.75$ , N-ties = 11 для группы с умеренной СНТ). В связи с этим медианные значения порогов в обеих группах были рассчитаны по индивидуальным данным, полученным в обеих полуплоскостях. В группах с легкой и умеренной СНТ они составили 0.3 и 0.4 с соответственно. Различия между ними оказались статистически не достоверны ( $p = 0.24$ ,  $n_1 = 32$ ,  $n_2 = 32$ , непараметрический тест Манна–Уитни для независимых выборок).

Для определения влияния возраста, потери слуха и продолжительности СНТ пациентов на величину ПВА для обеих групп был выполнен линейный корреляционный анализ (рис. 2). Анализ показал, что у пациентов с легкой СНТ существует прямая средней силы связь между величинами средней потери слуха и ПВА ( $R = 0.47$  и  $0.51$  для левой и правой полуплоскостей соответственно) (рис. 2c). Таким образом, увеличение порогов слуха сопровождалось в данной группе пациентов с повышением ПВА. В меньшей степени в группе с легкой СНТ была выражена связь ПВА с возрастом испытуемых:  $R = 0.28$  и  $0.29$  для левой и правой полуплоскостей соответственно – эти значения свидетельствовали о слабой взаимосвязи данных показателей (рис. 2a).

Коэффициенты корреляции между продолжительностью СНТ и ПВА при легкой СНТ были близки к нулю, что указывало на отсутствие значимой связи между ними (рис. 2e). Таким образом, в группе с легкой СНТ повышение порогов по времени ассоциировалось в основном с двумя параметрами – величиной потери слуха и, в меньшей степени, с возрастом испытуемых. Продолжительность СНТ мало влияла на ПВА у этой группы пациентов. Для пациентов с умеренной СНТ наблюдали противоположную картину: у них была обнаружена прямая связь средней силы между продолжительностью СНТ ( $R = 0.42$  и  $0.56$  для левой и правой полуплоскостей соответственно), однако у данной группы практически отсутствовали связи возраста и среднего порога слуха с порогом по времени, о чем свидетельствовали коэффициенты корреляции близкие к нулю (рис. 2b и 2d). Таким образом, в отличие от группы с легкой степенью СНТ, у пациентов с умеренной СНТ связь порогов по времени наблюдалась не с возрастом и средней потерей слуха, а с продолжительностью СНТ. Сводные данные о значениях коэффициентов корреляции между индивидуальными характеристиками пациентов и величиной порога по времени приведены в табл. 3.

Группы были подобраны таким образом, чтобы потеря слуха на обоих ушах у каждого из пациентов соответствовала одинаковой степени СНТ по классификации ВОЗ. Однако при оценке латерализации источника звука разница в величине порога слышимости 5 дБ и более может быть существенной [8] и приводить к субъективному сокращению воспринимаемой траектории движения. Нами была оценена связь между ПВА и разницей в средних порогах для левого и правого уха в обеих группах пациентов (табл. 1, 2). Связь между асимметрией порогов слуха и ПВА в группе пациентов с легкой степенью СНТ была слабо выражена ( $R = -0.21$  и  $-0.20$ ) (рис. 2). В этой группе различия в порогах слуха на левом и правом ухе не превышали 5 дБ. Для пациентов с умеренной СНТ была выявлена прямая связь средней силы ( $R = 0.57$  и  $0.57$ ) между асимметрией порогов слуха и порогами по времени (рис. 2f и 2h). Вместе с тем, при исключении из этой группы двух пациентов, у которых разница в порогах слуха для левого и правого уха превышала 5 дБ





**Рис. 2.** Индивидуальные пороги по времени для оценки направления движения звукового образа по азимутальной координате у пациентов с легкой (слева) и умеренной СНТ (справа). Зависимость от: (a), (b) – возраста пациентов; (c), (d) – средней потери слуха; (e), (f) – продолжительности СНТ; (g), (h) – абсолютного значения разности порогов для левого и правого уха (асимметрии слуха). На легенде приведены обозначения для порогов в левой и правой полуплоскостях. Каждый маркер демонстрирует результат однократного измерения порога адаптивным методом “один вверх–один вниз” у одного испытуемого. Пунктирная прямая отражает линейную аппроксимацию данных для левой полуплоскости, а непрерывная прямая – линейную аппроксимацию для правой полуплоскости. Приведены соответствующие уравнения и значения коэффициентов корреляции.

(по 9 дБ для обоих испытуемых), связь между асимметрией порогов слуха и порогов по времени, как и в группе с легкой СНТ, ослабевала ( $R = 0.23$  и  $R = 0.21$ ). Это указывает на слабое влияние небольшой (до 5 дБ) асимметрии порогов слуха на ПВА у пациентов обеих групп.

Ушной шум (tinnitus) был выявлен у 10 человек в двух обследуемых группах, что составило почти треть общего числа пациентов. Локализация источника на фоне шума, как правило, приводит к худшим результатам, чем при его отсутствии, поэтому было выполнено сопоставление результатов оценки ПВА для пациентов с шумом и без него в каждой из обследованных групп (рис. 3). Медианные значения порогов по времени в группе с легкой СНТ достоверно не различались у пациентов без ушного шума и с ушным шумом: они составили 0.25 и 0.30 с соответственно ( $p = 0.63$ ,  $n_1 = 18$ ,  $n_2 = 12$ , непараметрический критерий Манна–Уитни для независимых выборок). В группе с умеренной СНТ ПВА увеличивался более чем в три раза при наличии ушного шума ( $p < 0.05$ ,  $n_1 = 24$ ,  $n_2 = 8$ , непараметрический критерий Манна–Уитни для независимых выборок). У пациентов без ушного шума медианный порог по времени составил 0.3 с, тогда как у пациентов с ушным шумом он равнялся 1.0 с. Таким образом, наличие ушного шума оказывало значимое негативное влияние на величину порога по времени у пациентов с умеренной, но не с легкой СНТ.

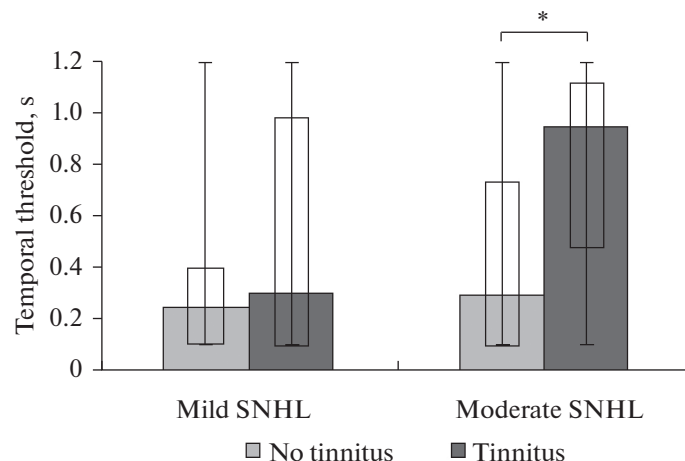
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При легкой и средней степени СНТ диапазон, в котором варьировали индивидуальные значения ПВА, оказался одинаковым и составлял от 0.1 до 1.2 с. Причем, по 7 пациентов в каждой из групп при оценке направления движения хотя бы в одной из полуплоскостей имели величину порога 0.1 с, что соответствует среднему

**Таблица 3.** Значения коэффициентов линейной корреляции ( $R$ ) между индивидуальными характеристиками пациентов и величиной порогов по времени для оценки направления движения звукового образа по азимутальной координате при легкой и умеренной СНТ

Характеристика пациентов	Легкая СНТ		Умеренная СНТ	
	слева	справа	слева	справа
Возраст	0.28	0.29	0.04	-0.14
Средняя потеря слуха	<b>0.47</b>	<b>0.51</b>	0.04	-0.06
Продолжительность СНТ	-0.11	-0.12	<b>0.43</b>	<b>0.56</b>
Абсолютное значение разницы порогов слуха на левом и правом ухе (асимметрия слуха)	-0.21	-0.20	<b>0.57</b>	<b>0.57</b>

Жирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции, свидетельствующие о наличии средней силы связи между данной характеристикой пациентов и порогом по времени.

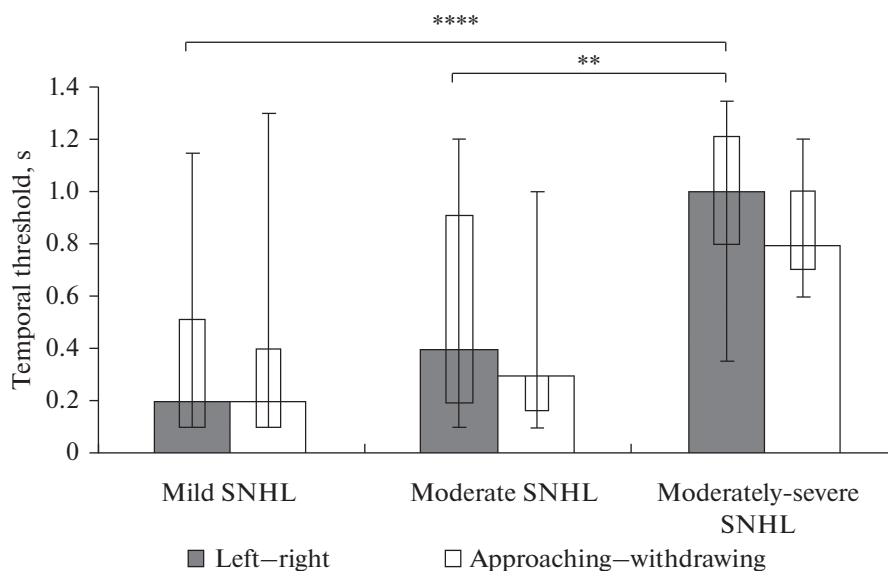


**Рис. 3.** Пороги по времени, необходимому для оценки направления движения звукового образа по азимуту, у пациентов, имеющих в анамнезе ушной шум, и без ушного шума. Результаты приведены отдельно для групп пациентов с легкой и умеренной СНТ. Указаны медианы, межквартильные интервалы (Q1–Q3), а также минимальные и максимальные значения. Показаны достоверные различия порогов по времени между пациентами без ушного шума и с ушным шумом внутри групп с умеренной СНТ: \* –  $p < 0.05$ , непараметрический парный тест Вилкоксона. Для группы с легкой СНТ:  $n_1 = 18$ ,  $n_2 = 12$ ; для группы с умеренной СНТ:  $n_1 = 24$ ,  $n_2 = 8$ .

значению, полученному при норме слуха [18]. Это означает, что сама по себе потеря слуха на высоких частотах при легкой и средней степени СНТ не обязательно приводит к ухудшению ПВА. В пользу этого свидетельствует и тот факт, что при снижении в широкополосном сигнале доли высоких частот в соответствии с типичной потерей слуха при умеренной СНТ у нормально слышащих испытуемых ПВА не изменялся [20].

Как было отмечено выше, увеличение ПВА при симметричной СНТ может быть вызвано другими причинами – нарушением надпорогового кодирования интенсивности и/или ухудшением слухового временного анализа. Надпороговое кодирование интенсивности изменяется как следствие сужения динамического диапазона слуха при повышении порогов слышимости и будет более выраженным с увеличением потери слуха. При потере слуха до 35 дБ у пациентов не наблюдали случаев, при которых ПВА превышали бы 0.7 с, преимущественно пороги составляли 0.1–0.2 с. При большей потере слуха ПВА могли возрастать до 1.2 с. В группе с легкой степенью СНТ была выявлена связь потери слуха с величиной ПВА (рис. 2с). Вместе с тем даже при потере слуха около 50 дБ ПВА мог практически оставаться в норме или незначительно ее превышать. Таким образом, можно полагать, что нарушение надпорогового кодирования не влияет критическим образом на оценку динамических изменений межшумных различий по интенсивности.

Сравнение измеренных ПВА с аналогичным образом измеренными порогоми для радиальной движения (ПВР), полученными при определении пациентами с симметричной потерей слуха приближается или удаляется звуковой образ, показало, что диапазоны изменений порогов по разным координатам акустического пространства и их медианы близки по величине для каждой из степеней СНТ (рис. 4). При разных степенях СНТ пороги различались, причем для обеих координат наблюдалось возрастание медианной величины порога с увеличением степени поте-



**Рис. 4.** Пороги по времени для оценки направления движения звукового образа по азимутальной и радиальной координатам у пациентов с легкой, умеренной и умеренно-тяжелой СНТ. Указаны медианы, межквартильные интервалы (Q1–Q3), а также минимальные и максимальные значения. Показаны достоверные различия порогов по времени при оценке направления движения по азимутальной координате между группами с разной потерей слуха: \*\* –  $p < 0.01$ , \*\*\*\* –  $p < 0.0001$ , непараметрический критерий Манна–Уитни для независимых выборок, внесена поправка Бонферрони. Пороги для оценки направления движения по радиальной координате и по азимутальной координате у пациентов с умеренно-тяжелой СНТ приведены по данным наших предыдущих работ: ПВА при умеренно-тяжелой СНТ [18]; пороги по времени для оценки направления движения звукового образа по радиальной координате при легкой [13], умеренной и умеренно-тяжелой СНТ [24]. Для азимутального движения:  $n = 31$ ,  $n = 32$  и  $n = 24$ ; для радиального движения:  $n = 16$ ,  $n = 21$ ,  $n = 3$  в группах с легкой, умеренной и умеренно-тяжелой СНТ соответственно.

ри слуха. Известно, что для локализации по азимуту бинауральные различия являются определяющими, тогда как основным признаком при оценке удаленности источника звука оказывается изменение уровня интенсивности сигнала с расстоянием [21]. Несмотря на существенные различия в механизмах локализации, пороги для каждой из групп пациентов оказались близкими и демонстрировали высокую вариабельность при всех степенях потери слуха. Это обстоятельство указывает на то, что для быстрой оценки направления движущегося источника звука существует важный фактор, который не связан непосредственно с величиной потери слуха. В качестве такого фактора может выступать нарушение временного слухового анализа, которое возникает как проявление центральных нарушений слуха.

Центральные нарушения слуха могут наблюдаться при СНТ и чаще возникают при большой потере слуха и/или при значительной продолжительности заболевания [22, 23]. Поэтому мы рассмотрели связь ПВА с обоими факторами. Существенный рост ПВА наблюдали у пациентов с потерей слуха более 35 дБ. У пациентов с умеренной СНТ была обнаружена прямая связь средней силы между продолжительностью СНТ и величиной ПВА, что косвенно указывает на центральные нару-

шения слуха как на возможную причину, по которой снижается скорость оценки движения источника звука.

Выяснить роль нарушения временного слухового анализа, возникающего при центральных нарушениях слуха, в оценке движения по азимуту у пациентов с СНТ можно было бы, применив батареи тестов, которые используют для выявления таких нарушений [22]. Однако это является предметом для дальнейших исследований.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № АААА-А18-118013090245-6).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Планирование экспериментов (И.А.Г., А.П.Г., Л.Е.Г.), акустические измерения и методическое сопровождение работы (А.П.Г.), организация и выполнение обследований в условиях клиники (Е.А.К., Л.Е.Г.), обработка и статистический анализ данных, подготовка иллюстративного материала (А.П.Г.), написание и редактирование манускрипта (И.А.Г., А.П.Г., Л.Е.Г., Е.А.К.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *de Almeida Ciquinato DS, Doi MY, da Silva RA, de Oliveira MR, de Oliveira Gil AW, de Moraes Marchiori LL* (2020) Posturographic analysis in the elderly with and without sensorineural hearing loss. *Int Arch Otorhinolaryngol* 24: e496-e502.  
<https://doi.org/10.1055/s-0040-1701271>
2. *de Souza Melo R* (2017) Gait performance of children and adolescents with sensorineural hearing loss. *Gait & Posture* 57: 109–114.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.05.031>
3. *Gates GA* (2012) Central Presbycusis. *Otolaryngol Head Neck Surg* 147: 1–2.  
<https://doi.org/10.1177/0194599812446282>
4. Cheslock M, De Jesus O (2021) Presbycusis. *Stat Pearls* [Internet].  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559220>
5. *Meuret S, Ludwig AA, Predel D, Staske B, Fuchs M* (2017) Localization and spatial discrimination in children and adolescents with moderate sensorineural hearing loss tested without their hearing aids. *Audiol Neurotol* 22: 326–342.  
<https://doi.org/10.1159/000485826>
6. *Denk F, Ewert SD, Kollmeier B* (2019) On the limitations of sound localization with hearing devices. *J Acoust Soc Am* 146: 1732–1744.  
<https://doi.org/10.1121/1.5126521>
7. *Akeroyd MA* (2014) An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends Hear* 18: 1–7.  
<https://doi.org/10.1177/2331216514560442>
8. *Middlebrooks JC* (2015) Sound localization. *Handbook Clin Neurol* 129: 99–116.
9. *Freigang C, Schmiedchen K, Nitsche I, Rübsamen R* (2014) Free field study on auditory localization and discrimination performance in older adults. *Exp Brain Res* 232: 1157–1172.
10. *Lundbeck M, Grimm G, Hohmann V, Laugesen S, Neher T* (2017) Sensitivity to angular and radial source movements as a function of acoustic complexity in normal and impaired hearing. *Trends Hear* 21: 2331216517717152.  
<https://doi.org/10.1177/2331216517717152>
11. *Noble W, Byrne D, Lepage B* (1994) Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment. *J Acoust Soc Am* 95: 992–1005.
12. *Neher T, Lunner T, Hopkins K, Moore BC* (2012) Binaural temporal fine structure sensitivity, cognitive function, and spatial speech recognition of hearing-impaired listeners. *J Acoust Soc Am* 131: 2561–2564.  
<https://doi.org/10.1121/1.3689850>

13. Гвоздева АП, Ситдииков ВМ, Андреева ИГ (2020) Скрининговый метод оценки пространственной и временной разрешающей способности слуха при локализации движения по азимутальной координате. Рос физиол журн им ИМ Сеченова 106: 1170–1188. [Gvozdeva AP, Sitdikov VM, Andreeva IG (2020) A screening method for assessment of spatial and temporal resolution of the auditory system in case of azimuthal movement localization. Russ J Physiol 106: 1170–1188. (In Russ)].  
<https://doi.org/10.31857/S0869813920090113>
14. Thurlow WR, Runge PS (1967) Effect of induced head movements on localization of direction of sounds. J Acoust Soc Am 42: 480–488.
15. Harris JD, Sergeant RL (1971) Monaural/binaural minimum audible angle for a moving sound source. J Speech Hear Res 14: 618–629.
16. Grantham DW (1986) Detection and discrimination of simulated motion of auditory targets in the horizontal plane. J Acoust Soc Am 79: 1939–1949.  
<https://doi.org/10.1121/1.393201>
17. Bauer BB (1961) Phasor analysis of some stereophonic phenomena. J Acoust Soc Am 33: 1536–1539.
18. Gvozdeva AP, Klishova EA, Sitdikov VM, Golovanova LE, Andreeva IG (2021) Minimal time to determine direction of azimuthally moving sounds in moderately severe sensorineural hearing loss. POMA 43: 050003. Acoustical Soc America.  
<https://doi.org/10.1121/2.0001451>
19. Witton C, Talcott JB, Henning GB (2017) Psychophysical measurements in children: challenges, pitfalls, and considerations. Peer J 5: e3231.  
<https://doi.org/10.31857/S0869813920090113>
20. Андреева ИГ, Гвоздева АП, Огородникова ЕА (2018) Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника при моделировании снижения высокочастотного слуха. Сенс сист 32: 277–284. [Andreeva IG, Gvozdeva AP, Ogorodnikova EA (2018) Threshold duration of audio signals for assessment of the proximity and leaving of their source in modeling of the decrease in high-frequency hearing. Sens Syst 32: 277–284. (In Russ)].  
<https://doi.org/10.1134/S0235009218040029>
21. Kolarik AJ, Moore BC, Zahorik P, Cirstea S, Pardhan S (2016) Auditory distance perception in humans: A review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. Atten Percept Psychophys 78: 373.  
<https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1>
22. Musiek FE, Chermak GD (2014) Handbook of Central Auditory Processing Disorder 1: Auditory Neuroscience and Diagnosis. San Diego. Plural. 2nd ed.
23. Бобошко МЮ, Гарбарук ЕС, Жилинская ЕВ, Абу-Джамеа АХ (2014) Временная разрешающая способность слуховой системы при сенсоневральной тугоухости. Сенс Сист 28: 10–15. [Boboshko MYu, Garbaruk ES, Zhilinskaya EV, Abu-Dzamea A Kh (2014) Temporal resolution of the auditory system in sensorineural hearing loss. Sens Syst 28: 10–15. (In Russ)].
24. Андреева ИГ, Кlishova EA, Gvozdeva AP, Sitdikov VM, Golovanova LE, Ogorodnikova EA (2020) 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. Hum Physiol 46: 465–472.

### Temporal Characteristics of Azimuthally Moving Sound Source Localization in Patients with Mild and Moderate Sensorineural Hearing Loss

E. A. Klishova<sup>a</sup>, A. P. Gvozdeva<sup>a, \*</sup>, L. E. Golovanova<sup>b</sup>, and I. G. Andreeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>b</sup> Mechnikov North-Western State Medical University, St. Petersburg, Russia

\*e-mail: kukumalu@mail.ru

The work is devoted to investigation of auditory motion localization in patients with sensorineural hearing loss (SNHL). Minimal time to determine direction of azimuthal motion (MTAM) was determined for 15 patients with mild SNHL and 16 patients with moderate SNHL. An illusion of the sound source motion in free field was created by counterdirectional change of the amplitude of sound bursts sequences (0.2–8 kHz) at two loudspeakers placed to the left and to the right of the patient by 30° angles. To determine MTAM “one up–one down” adaptive psychoacoustic procedure was implemented with the use of two-alternative forced choice. Individual MTAMs in both groups varied from 0.1 to 1.2 s. Median MTAMs were 0.3 s for mild SNHL and 0.4 s for moderate

---

SNHL. The values were not significantly different from each other, however they were 3–4 times higher than in normally hearing subjects – 0.1 s. Linear correlational analysis showed that in patients with mild SNHL there was direct relationship between MTAM increase and hearing loss. In patients with moderate SNHL direct linear relationship was found between MTAM and duration of the disease, and hearing thresholds asymmetry, which did not exceed 9 dB. Comparison of MTAMs for patients with and without tinnitus revealed that the symptom significantly affects MTAM in moderate, but not mild SNHL. The data obtained evidence that worsening of auditory motion localization temporal characteristics in SNHL is associated not so much with hearing loss but with decreasing dynamic range of hearing at high frequencies and involvement of central auditory system into pathological process due to its insufficient afferent stimulation.

*Keywords:* sensorineural hearing loss, spatial hearing, moving sound source localization, azimuthal motion, temporal characteristics of hearing