

EDN: <https://elibrary.ru/flpbe>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-6-358-371>

УДК 534.6.08; 613.644; 612.85

© Коллектив авторов, 2024

Прокопенко Л.В., Булгакова М.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В.

Оценка воспроизводимости и точности измерений передаточной функции наружного уха методом *F-MIRE*

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

Введение. Передаточная функция наружного уха является важной характеристикой органа слуха, определяемой акустическими свойствами ушной раковины и наружного слухового прохода, их формой и размерами. Также, вероятно, имеет значение акустический импеданс барабанной перепонки.

Частотные характеристики передаточной функции наружного уха должны учитываться при выборе индивидуальных средств защиты от шума и в слухопротезировании. Проведённые разными исследователями измерения зондовым микрофоном распределения звукового давления вдоль слухового прохода показали, что для частот выше 3 кГц оно может значительно изменяться. В то же время отмечалось, что относительные измерения реальных акустических характеристик слуховых аппаратов и индивидуальных средств защиты от шума, когда конец микрофонного зонда не меняет положения, достаточно точны. (Sullivan, 1988; Traunor, Ackley, Wiersbowski, 1989; Johnson, Nelson, 1991; Hellstrom, Axelsson, 1993; Searchfield, Purdy, 1997).

Цель исследования — оценка воспроизводимости метода *F-MIRE* и точности результатов измерения передаточной функции наружного уха при фиксации зондового микрофона проволочной скобой из комплекта приспособлений микрофона. Определение возможных изменений акустических характеристик наружного уха при действии шума различного уровня, их связи с размерами ушной раковины и наружного слухового прохода, состоянием слуховой функции.

Материалы и методы. Методом *F-MIRE* (микрофон в реальном ухе) в третьоктавных полосах частот и в частотных коррекциях А и С неоднократно измерялась передаточная функция наружного уха (*TFOE*) при действии широкополосного шума различных уровней у 17 испытуемых (16 мужчин и 1 женщина) в возрасте от 25 до 80 лет в условиях звуковой камеры. Определялись геометрические размеры ушной раковины и слухового прохода. Все испытуемые были осмотрены врачом-отоларингологом с проведением аудиологического исследования. Каждый испытуемый дал информированное согласие на участие в исследовании.

Результаты. По данным выполненных исследований установлено:

1. Наиболее информативными показателями передаточной функции наружного уха — *TFOE* является её величина на частоте первого резонанса, в третьоктавных полосах частот 500–4000 Гц и в частотной коррекции А, при этом наиболее точными являются результаты измерений в третьоктавных полосах частот, близких к резонансной.
2. Размах результатов спектральных измерений *TFOE* увеличивается в третьоктавных полосах 4,0 кГц и выше. В этом диапазоне частот может сказываться как интерференция прямой и отражённой от барабанной перепонки звуковой волны, так и неточность позиционирования зондового микрофона.
3. Передаточная функция наружного уха носит индивидуальный характер, *TFOE* левого и правого уха различны у испытуемых.
4. Основной резонанс у большинства испытуемых левого уха величиной 14–22 дБ и правого уха 11–18 дБ находится в третьоктавной полосе 2,5 кГц.
5. У большинства испытуемых *TFOE* основного резонанса левого уха превышает величину правого уха на 0,5–6 дБ.
6. Достоверной зависимости изменений *TFOE* от уровня воздействующего шума (изменения акустического импеданса барабанной перепонки) не выявлено.
7. Достоверная зависимость связи величины *TFOE* на основном резонансе с размерами ушной раковины и наружного слухового прохода определена только у части испытуемых для правого уха.
8. Воспроизводимость метода *F-MIRE* для измерения спектральных величин *TFOE* можно оценить как высокую, если испытуемые были неподвижны во время измерений.

Заключение. Настоящее исследование представляет собой попытку оценить возможности метода *MIRE* (*F-MIRE*), его воспроизводимости и точности. Показан потенциал метода для анализа влияния шума на слух и понимание влияния различных факторов на точность измерений звукового давления в наружном слуховом проходе.

Ключевые слова: передаточная функция наружного уха — *TFOE*; зондовый микрофон; метод *F-MIRE*; воспроизводимость метода; точность измерений

Для цитирования: Прокопенко Л.В., Булгакова М.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. Оценка воспроизводимости и точности измерений передаточной функции наружного уха методом *F-MIRE*. *Мед. труда и пром. экол.* 2024; 64(6): 358–371. <https://elibrary.ru/flpbe> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-6-358-371>

Для корреспонденции: Курьеров Николай Николаевич, e-mail: courierov@mail.ru

Участие авторов:

Прокопенко Л.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста;

Булгакова М.В. — проведение клинических исследований;

Курьеров Н.Н. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста;

Лагутина А.В. — сбор и обработка данных, написание текста.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 27.06.2024 / Дата принятия к печати: 03.07.2024 / Дата публикации: 31.07.2024

Lyudmila V. Prokopenko, Maria V. Bulgakova, Nikolay N. Kuryerov, Alla V. Lagutina

Evaluation of reproducibility and accuracy of measurements of the transfer function of the outer ear by the F-MIRE method

Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275

Introduction. The transfer function of the outer ear is an important characteristic of the hearing organ, determined by the acoustic properties of the auricle and the external auditory canal, their shape and size. The acoustic impedance of the eardrum is also likely to matter.

The frequency characteristics of the transmission function of the outer ear must be taken into account when choosing individual noise protection devices and when prosthetics of the hearing organs. Measurements of the sound pressure distribution along the auditory canal carried out by various researchers with a probe microphone have shown that for frequencies above 3 kHz, it can vary significantly. At the same time, it was noted that the relative measurements of the actual acoustic characteristics of hearing aids and individual noise protection devices, when the end of the microphone probe does not change position, are quite accurate (Sullivan, 1988; Traynor, Ackley, Wiersbowski, 1989; Johnson, Nelson 1991; Hellstrom, Axelsson, 1993; Searchfield, Purdy, 1997).

The study aims to evaluate the reproducibility of the F-MIRE method and the accuracy of the measurement results of the transfer function of the outer ear when fixing the probe microphone with a wire bracket from a set of microphone devices; to determine possible changes in the acoustic characteristics of the outer ear under the influence of noise of various levels, their relationship with the size of the auricle and the external auditory canal, the state of auditory function.

Materials and methods. Using the F-MIRE method (microphone in a real ear) in the third-octave frequency bands and in frequency corrections A and C, specialists repeatedly measured the transfer function of the outer ear (TFOE) when exposed to broadband noise of various levels in 17 subjects (16 men and 1 woman) aged 25 to 80 years in a sound chamber. The researchers determined the geometric dimensions of the auricle and the auditory canal. The otolaryngologist examined all the subjects with an audiological examination. Each subject gave informed consent to participate in the study.

Results. Experts have established according to the data of the conducted research:

1. The most informative indicators of the transfer function of the outer ear — TFOE is its value at the frequency of the first resonance, in the third-octave frequency bands 500–4000 Hz and in the frequency correction A, while the most accurate are the measurement results in the third-octave frequency bands close to the resonant one.
2. The range of TFOE spectral measurement results increases in the third-octave bands of 4.0 kHz and above. In this frequency range, both interference of the direct and reflected sound waves from the eardrum and inaccuracy of positioning of the probe microphone can affect.
3. The transfer function of the outer ear is individual, the TFOE of the left and right ears are different in the subjects.
4. The main resonance in the majority of subjects of the left ear of 14–22 dB and the right ear of 11–18 dB is in the third octave band of 2.5 kHz.
5. In most subjects, the TFOE of the main resonance of the left ear exceeds the value of the right ear by 0.5–6 dB.
6. There was no significant dependence of TFOE changes on the level of impacting noise (changes in the acoustic impedance of the eardrum).
7. A reliable relationship between the TFOE value at the main resonance and the size of the auricle and the external auditory canal was determined only in a part of the subjects for the right ear.
8. The reproducibility of the F-MIRE method for measuring spectral values of TFOE can be estimated as high if the subjects were motionless during the measurements.

Conclusion. *The present study is an attempt to evaluate the capabilities of the MIRE (F-MIRE) method, its reproducibility and accuracy. The researchers have shown the potential of the method for analyzing the effects of noise on hearing and understanding the influence of various factors on the accuracy of sound pressure measurements in the external auditory canal.*

Keywords: transfer function of the outer ear — TFOE; probe microphone; F-MIRE method; reproducibility of the method; measurement accuracy

For citation: Prokopenko L.V., Bulgakova M.V., Kuryerov N.N., Lagutina A.V. Evaluation of reproducibility and accuracy of measurements of the transfer function of the outer ear by the F-MIRE method. *Med. truda i prom. ekol.* 2024; 64(6): 358–371. <https://elibrary.ru/flpbe> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-6-358-371> (in Russian)

For correspondence: Nikolay Nikolaevich Kuryerov, e-mail: courierov@mail.ru

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 27.06.2024 / Accepted: 03.07.2024 / Published: 31.07.2024

Введение. Необходимость определения передаточной функции наружного уха возникла при решении проблемы объективной оценки акустической эффективности (АЭ) средств индивидуальной защиты органа слуха (СИЗОС) в производственных условиях и при выборе слухового аппарата в слухопротезировании [1]. Представляется необходимым учитывать спектральную характеристику передаточной функции наружного уха при оценке условий труда работников, применяющих гарнитуры связи [2].

Метод измерения звукового давления зондовыми микрофонами и проблемы, связанные с их позиционированием, влияющим на точность измерений известны достаточно давно (Sullivan, 1988; Johnson, Nelson, 1991; Traynor, Ackley, Wiersbowski, 1989; Searchfield, Purdy, 1997) [3–6].

Международный стандарт ISO 11904-1:2002, стандарты США ANSIS3.19, ANSI/ASA S3.35, ANSIS3.46, ANSI/ASA S12.6, ANSI/ASA S12.42 и национальные стандарты разных стран в этом направлении определили возможности метода MIRE (F-MIRE) для оценки качества слуховых аппаратов и противошумов [1, 6–8].

Оценке надёжности и точности измерений звукового давления в слуховом проходе зондовым микрофоном также уделяли внимание Searchfield, Purdy, 1997; Hellstrom, Axelsson, 1993 [6, 9].

Измерения уровня звукового давления зондовыми микрофонами на частотах от 0,25 до 4 кГц в наружном слуховом проходе считаются надёжным методом проверки слухового аппарата. Однако выше 4 кГц влияние стоячих

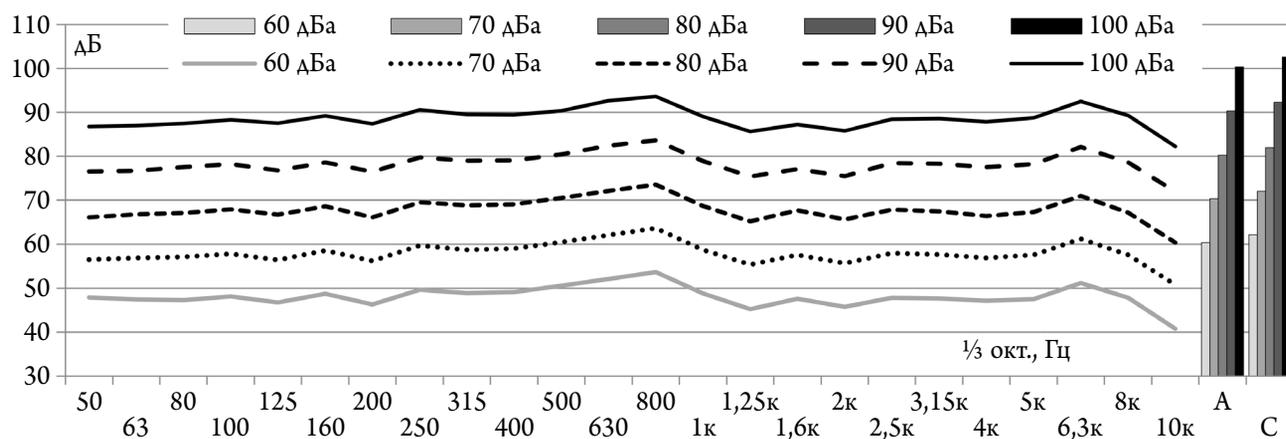


Рис. 1. Третьооктавные спектры и уровни звука А и С шума при проведении измерений TFOE
Fig. 1. Third-octave spectra and sound levels of A and C noise during TFOE measurements

волн в слуховом проходе снижают точность этих измерений (McCreery et al., 2009; Hiipakka, 2012) [10, 11].

Точное определение реального звукового давления внутри наружного уха зависит от положения зонда микрофона (Dirks, Ahlstrom, Eisenberg, 1994; Dirks, Kincaid, 1987) [12, 13].

Для измерений, применяемых в клинической практике, и для относительных измерений звукового давления внутри наружного уха, рекомендуются методы с постоянной глубиной введения зонда, равной средней длине наружного слухового прохода не более 25–27 мм [14, 15]. В стандарте ГОСТ Р ИСО 11904-1-2017¹ описан метод таких измерений и приведены усреднённые данные о частотных характеристиках наружного уха в свободном или диффузном поле² в зависимости от положения точки измерения по данным различных авторов.

Проведённые пилотные исследования в производственных условиях с использованием метода F-MIRE по оценке акустической эффективности СИЗОС в октавных полосах частот с учётом передаточной функции открытого уха показали, что передаточная функция наружного уха носит индивидуальный характер, TFOE левого и правого уха человека различны. Основной резонанс открытого уха величиной 12–16 дБ у большинства испытуемых находится в октавной полосе 2 кГц. Метод F-MIRE позволяет определить TFOE для каждого уха работника [16].

Цель исследования — оценка воспроизводимости метода F-MIRE и точности результатов измерения передаточной функции наружного уха при фиксации зондового микрофона проволоочной скобой из комплекта приспособлений микрофона. Определение возможных изменений акустических характеристик наружного уха при действии шума различного уровня, их связи с размерами ушной раковины и наружного слухового прохода, состоянием слуховой функции.

Материалы и методы. Измерения передаточной функции наружного уха проводились с участием 17 ис-

пытуемых (16-и мужчин и одной женщины) в возрасте от 25 до 80 лет методом F-MIRE в третьооктавных полосах частот и в частотных коррекциях А и С при действии широкополосного шума разных уровней в условиях звуковой камеры. Все испытуемые были осмотрены врачом-отоларингологом с проведением аудиологического исследования. Каждый испытуемый дал информированное согласие на участие в исследовании. Восемь из 16 испытуемых-мужчин приняли участие в шести сериях измерений, двое — в четырёх, один — в трёх и пятеро — однократно. Испытуемая-женщина и один испытуемый-мужчина участвовали в исследованиях однократно по сокращённой программе.

В каждой серии измерений испытуемые подвергались действию шума с плоским широкополосным спектром на пяти уровнях звука А от 60 до 100 дБ с шагом 10 дБ, который воспроизводился в звуковой камере с малым временем реверберации (рис. 1). Звучание каждого уровня составляло около 60 с, общая продолжительность серии измерения составляла 5 мин. Сокращённая серия состояла из четырёх уровней звука А от 60 до 90 дБ.

Звуковое давление в наружном слуховом проходе правого и левого уха испытуемых измерялось миниатюрными микрофонами с зондами длиной 16 мм. Для фиксации в наружных слуховых проходах микрофоны закреплялись на дугообразных проволоочных скобах из комплекта приспособлений микрофона, скобы и соединительные провода фиксировались лейкопластырем на околоушной области головы. Положение зонда в наружном слуховом проходе в течение 300 с серии измерений не изменялось, но могло быть другим при проведении следующих серий измерения. Звуковое давление внешнего звукового поля измерялось микрофонами, расположенными в 10 см от каждого уха испытуемого. Хронограммы уровня звука А, измеренные двумя микрофонами, и расположение микрофонов при измерениях TFOE представлены на рисунке 2.

Уровни звукового давления, измеренные четырьмя микрофонами, регистрировались двумя двуканальными шумомерами-анализаторами спектра каждую секунду. Начало измерения двумя приборами синхронизировалось с точностью до 0,5 с. Записи предварительно анализировались с помощью программного обеспечения «Помощник» и SvanPC++. Данные третьооктавных спектров и уровней звука А и С за каждую секунду измерений экспортировались в MS Excell для дальнейшей обработки.

¹ ГОСТ Р ИСО 11904.1-2017 Акустика. Определение излучения близко расположенных к уху источников звука. Часть 1. Метод с использованием микрофона внутри уха (ISO 11904:2002, Acoustics — Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear — Part 1: Technique using a microphone in a real ear (MIRE technique), IDT). М.: Стандартинформ. 2017.

² Частотную характеристику уха также называют передаточной функцией (TFOE), которая определяется по разности уровней внешнего шума и шума внутри слухового прохода.

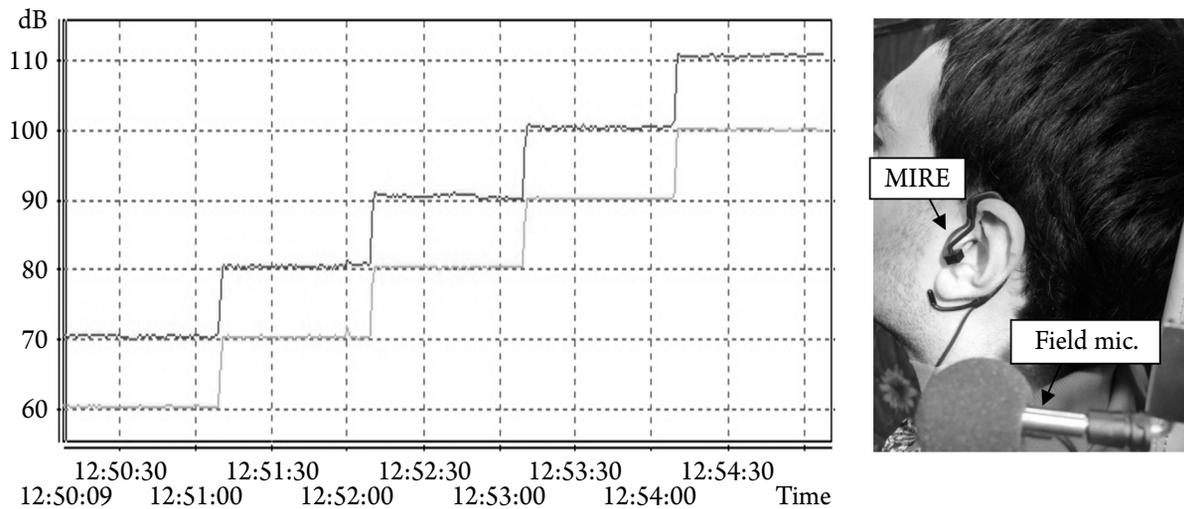


Рис. 2. Хронограммы уровня звука А, измеренные двумя микрофонами, и расположение микрофонов при измерениях TFOE

Примечание: верхняя кривая — уровни звука А внешнего шума, нижняя кривая — уровни звука А внутри наружного слухового прохода.

Fig. 2. Chronograms of the sound level A, measured by two microphones, and the location of the microphones during TFOE measurement

Note: The upper curve is the sound levels A of the external noise; the lower curve is the sound levels A inside the external auditory canal.

Передачная функция определялась как разность уровней звукового давления, измеренных внешним микрофоном и зондовым микрофоном внутри наружного слухового прохода за каждую секунду в третьоктавных полосах частот от 50 до 10 000 Гц и частотных коррекциях А и С для каждого уха испытуемого. Далее определялись усреднённые величины TFOE примерно за 60 с для каждого из пяти уровней шума в каждом измерении, результаты измерений за 1–3 с при изменении уровня шума на 10 дБ из анализа исключались. Кроме того, были определены величины стандартного отклонения TFOE для каждого периода усреднения.

Корреляционный и статистический анализ результатов измерений проводился с помощью встроенных средств MS Excell.

Для оценки воспроизводимости метода измерения спектральных величин TFOE результаты неоднократных исследований каждого отдельного испытуемого усреднялись и определялись корреляционные коэффициенты между усреднёнными спектральными величинами TFOE и спектральными величинами TFOE в каждой серии измерений для этого испытуемого.

Точность измерений оценивалась по максимальному стандартному отклонению ($\delta 1$) в каждой серии измерений (при постоянных положениях зондовых микрофонов в каждой серии), стандартному отклонению TFOE для каждого из пяти уровней действующего шума ($\delta 2$) с учётом возможного изменения положения зондовых микрофонов в разных сериях измерений и общему стандартному отклонению величин TFOE для всех измерений правого и левого уха каждого испытуемого ($\delta 3$) с учётом возможного изменения положения зондовых микрофонов в разных сериях измерений. Кроме того, оценивался разброс результатов измерений с учётом возможного изменения положения зондовых микрофонов в разных сериях измерений.

Возможное изменение акустических характеристик наружного уха испытуемых при действии шума различного уровня определялось по спектрам TFOE на пяти уровнях действующего шума.

Для определения связи акустических характеристик наружного уха испытуемых с размерами ушной раковины и наружного слухового прохода рассчитывали отношение площади ушной раковины и площади сечения слухового прохода.

Линейные размеры ушной раковины испытуемых определяли с точностью до 1,0 мм, при минимальном размере раковины 43,0 мм ошибка измерения не превышала 2,5%.

Площадь ушной раковины определяли по площади её контура на фото с учётом масштаба, используя программное обеспечение *IpSquare v5.0 for Windows*, площадь сечения наружного слухового прохода определяли по изготовленному из материала *OtoformAk* слепку слухового прохода, как площадь эллипса на глубине 16 мм, линейные размеры эллипса ($d1$ и $d2$) измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, при минимальном значении $d2=4,3$ мм ошибка измерения не превышала 2,5%. Общая ошибка определения размеров ушной раковины и наружного слухового прохода не превышала 5,0%.

Если очень упрощённо представить наружное ухо человека (ушную раковину и слуховой проход) как рупор, то, без учёта влияния отражённой от барабанной перепонки звуковой волны, звуковое давление, согласно адиабатическому закону, будет изменяться обратно пропорционально сечению рупора.

Сравнивали максимальную величину TFOE и двадцать логарифмов отношения площадей ушной раковины и наружного слухового прохода. В случае, если разница TFOE в соседних с максимальной третьоктавной полосе не превышала 3 дБ, максимальное значение TFOE определяли как суммарную в этих третьоктавах (далее TFOE), что справедливо при достаточно остром резонансе, т. е. высокой добротности системы. Но небольшая разница в соседних с максимальной третьоктавных полосах возможна и при невыраженном резонансе (низкой добротности системы). Тогда максимальное значение TFOE будет соответствовать результату в максимальной третьоктаве (TFOE'). Было проведено сравнение для обоих случаев, для TFOE и TFOE', соответственно.

Результаты. На *рисунке 3* представлены усреднённые по шести сериям результаты измерений TFOE в третьоктавных полосах частот 50–10 000 Гц в частотных коррекциях А и С для правого и левого уха одного из испытуемых при действии широкополосного шума на пяти уровнях звука А от 60 до 100 дБ с шагом 10 дБ.

Основные результаты измерений TFOE для правого и левого уха всех испытуемых представлены в *таблице 1*.

Спектры TFOE для правого и левого уха всех испытуемых имеют слабо выраженную зону в дорезонансном диапазоне третьоктавов от 50–80 до 500–800 Гц. В этом диапазоне неопределённость измерений TFOE сравнима с её

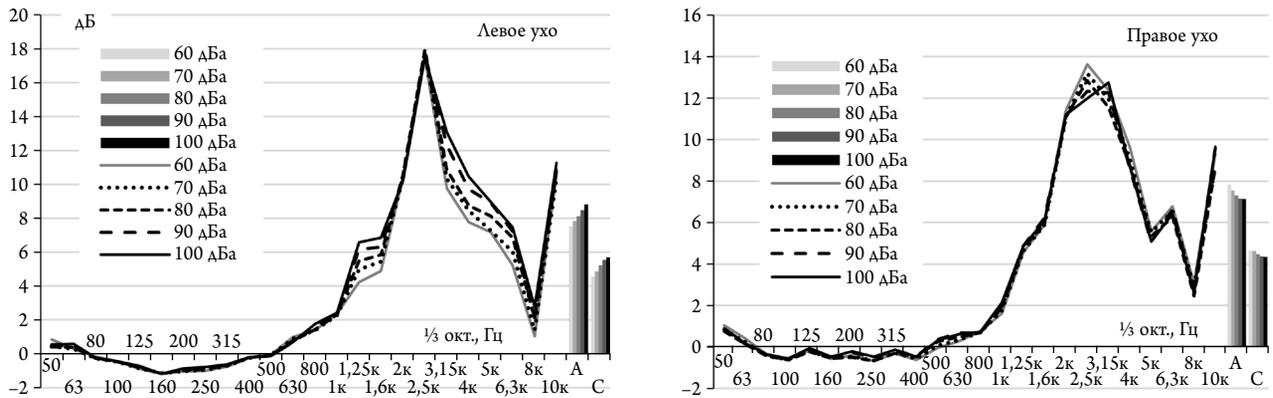


Рис. 3. Результаты спектральных измерений TFOE в третьоктавных полосах частот 50–10 000 Гц и в частотных коррекциях А и С правого и левого уха одного из испытуемых при действии широкополосного шума на пяти уровнях звука А от 60 до 100 дБ с шагом 10 дБ
Fig. 3. The results of spectral measurements of TFOE in the third-octave frequency bands 50–10,000 Hz and in frequency corrections A and C of the right and left ears of one of the subjects under the action of broadband noise at five sound levels A from 60 to 100 dB in increments of 10 dB

Таблица 1 / Table 1

Основные результаты измерений TFOE для правого и левого уха испытуемых
The main results of TFOE measurements for the right and left ears of the subjects

№ испытуемого	Правое ухо испытуемого						Левое ухо испытуемого					
	Граничные третьоктавы с отрицательными величинами TFOE, Гц		Третьоктавы основного и дополнительных резонансов TFOE, кГц			Величина основного резонанса TFOE, дБ	Граничные третьоктавы с отрицательными величинами TFOE, Гц		Третьоктавы основного и дополнительных резонансов TFOE, кГц			Величина основного резонанса TFOE, дБ
	Нижняя	Верхняя	Осн.	2й	3й		Нижняя	Верхняя	Осн.	2й	3й	
1	80	500	2,5	—	—	17,0	80	630	2,5	—	—	19,5
2	80	500	2,5	—	—	15,5/12,3*	80	500	2,5	—	—	17,7
3	80	500	2,5	5,0	—	15,8/13,7*	63	500	2,5	6,3	—	18,2
4	80	500	2,5	6,3	—	14,8	63	630	2,5	5,0	—	18,9
5	63	630	2,5	—	—	18,9/16,8*	63	630	2,5	—	—	22,3
6	80	500	2,5	4,0	—	14,9/12,1*	63	500	2,5	4,0	6,3	15,8
7	80	400	2,0	3,15	6,3	11,2	80	500	2,5	5,0	—	15,7/13,8*
8	80	630	2,5	4,0	—	17,6	80	500	3,15	6,3	—	18,7
9	80	500	3,15	6,3	—	13,8/11,0*	63	500	2,5	5,0	—	19,8
10	80	630	2,5	—	—	14,4/11,7*	63	630	2,5	—	—	19,3
11	80	500	2,5	—	—	15,0	50	800	2,5	—	—	20,0
12	80	500	2,0	3,15	—	15,9/14,0*	80	500	2,5	6,3	—	11,4
13	80	500	2,5	6,3	—	14,4	80	500	2,5	—	—	19,7
14	50	315	2,5	4,0	6,3	14,6	80	500	2,5	6,3	—	14,7
15	80	630	2,5	6,3	—	16,0	63	400	2,5	6,3	—	18,2
16	80	400	2,5	6,3	—	22,1	50	315	2,5	5,0	6,3	18,7
17	50	250	2,5	6,3	—	17,4/13,9*	63	250	2,5	4,0	—	18,1

Примечание: * — в числителе приведены величины основного резонанса TFOE, в знаменателе — TFOE'.
 Note: * — the numerator shows the values of the main resonance TFOE, in the denominator — TFOE'.

величиной, величины *TFOE* не имеют каких-либо закономерностей изменения. Поэтому дорезонансный диапазон до третьоктавы 500 Гц исключён из дальнейшего анализа, как мало информативный.

Оценка воспроизводимости результатов измерения спектральных величин *TFOE* проводилась по минимальным-средним и минимальным-минимальным величинам корреляционных коэффициентов результатов неоднократных спектральных измерений у 11 испытуемых-мужчин для каждого уха и по минимальным-средним величинам корреляционных коэффициентов спектров *TFOE* между правым и левым ухом (табл. 2).

Как видно, в 91,0% измерений на левом ухе и 77,0% на правом ухе испытуемых зарегистрирована высокая степень корреляции (более 0,9) спектральных измерений *TFOE*. Несколько сниженная корреляция результатов у испытуемых (№ 2 и № 7) связана с их поведением (изменением позы и произвольными движениями) во время измерений. Следовательно, воспроизводимость метода *F-MIRE* для измерения спектральных величин *TFOE* можно оценить как высокую, если испытуемые были неподвижны во время измерений.

Точность измерений оценивалась по стандартному отклонению ($\delta 1$), общему стандартному отклонению ($\delta 3$) и размаху результатов измерений.

Максимальное стандартное отклонение *TFOE* ($\delta 1$) в третьоктаве 2,5 кГц в однократных сериях измерений обычно не превышала 0,2–0,5 дБ при спокойном (неподвижном) поведении испытуемого и могла достигать 1,0–1,5 дБ, если во время измерений испытуемый не был неподвижен, например, изменял положение головы на подголовниках, поправлял причёску и т. д. При анализе точности измерений учитывали результаты как «спокойного», так и «неспокойного» испытуемых.

По неоднократным измерениям *TFOE* у 11 испытуемых-мужчин для левого уха максимальное стандартное отклонение *TFOE* ($\delta 1$) в третьоктаве 2,5 кГц составило от 0,27 до 1,49, для правого — от 0,27 до 1,22 дБ.

Стандартное отклонение незначительно росло в третьоктавах выше основного резонанса, закономерности роста не выявлено. В третьоктавах 500–8000 Гц максимальное стандартное отклонение ($\delta 1$) для левого уха испытуемого составило от 0,06 до 2,22, для правого — от 0,08 до 1,53 дБ.

Общее стандартное отклонение *TFOE* ($\delta 3$) в третьоктаве 2,5 кГц для левого уха испытуемых составило от 1,03 до 2,85 дБ, для правого — от 0,91 до 2,73 дБ, в третьоктавах 500–8000 Гц общее стандартное отклонение ($\delta 3$) для левого уха составило от 0,23 до 3,46, для правого — от 0,30 до 3,92 дБ.

Размах результатов измерений *TFOE* имеет значительную зависимость от частоты, в третьоктавах выше основного резонанса размах в отдельных случаях превышал 10 дБ.

Размах результатов неоднократных измерений в третьоктаве 2,5 кГц у 11 испытуемых-мужчин для левого уха составил от 0,65 до 4,71, для правого — от 1,87 до 6,28 дБ; в третьоктавах 500–8000 Гц для левого уха размах составил от 0,10 до 10,71, для правого — от 0,23 до 11,85 дБ. Наибольший размах (>10 дБ) был отмечен в третьоктаве 5000 Гц у двух «неспокойных» испытуемых и у двух «спокойных» в третьоктаве 8000 Гц.

На рисунке 4 представлены полученные в 6 сериях измерений усреднённые спектры *TFOE*, максимальные стандартные отклонения ($\delta 1$) в каждой серии измерений *TFOE* и разброс результатов *TFOE* в третьоктавах 500–8000 Гц у «спокойного» и «неспокойного» испытуемых при действии широкополосого шума с уровнем 80 дБА для левого и правого уха.

При постановке задач исследований ожидалось обнаружить рост *TFOE* на резонансной частоте и изменение резонансной частоты при увеличении звукового давления внешнего шума из-за акустического рефлекса.

Рост *TFOE* на резонансной частоте при увеличении звукового давления внешнего шума был обнаружен только для левого уха одного испытуемого из 17 (рис. 5а).

Таблица 2 / Table 2

Величины корреляционных коэффициентов между результатами неоднократных измерений спектральных величин *TFOE* у 11 испытуемых-мужчин

The values of the correlation coefficients between the results of repeated measurements of spectral values of *TFOE* in 11 male subjects

№ испытуемого	Правое ухо испытуемого		Левое ухо испытуемого		Правое-левое
	Минимальная-средняя	Минимальная-минимальная	Минимальная-средняя	Минимальная-минимальная	Минимальная-средняя
1	0,932	0,920	0,951	0,946	0,826
2	0,932	0,913	0,817	0,616	0,934
3	0,958	0,957	0,923	0,914	0,835
4	0,951	0,948	0,920	0,907	0,868
5	0,982	0,978	0,984	0,982	0,943
6	0,967	0,958	0,963	0,959	0,936
7	0,827	0,801	0,810	0,490	0,601
8	0,948	0,940	0,962	0,959	0,840
9	0,919	0,915	0,981	0,978	0,607
10	0,915	0,912	0,960	0,955	0,866
11	0,970	0,968	0,954	0,945	0,972

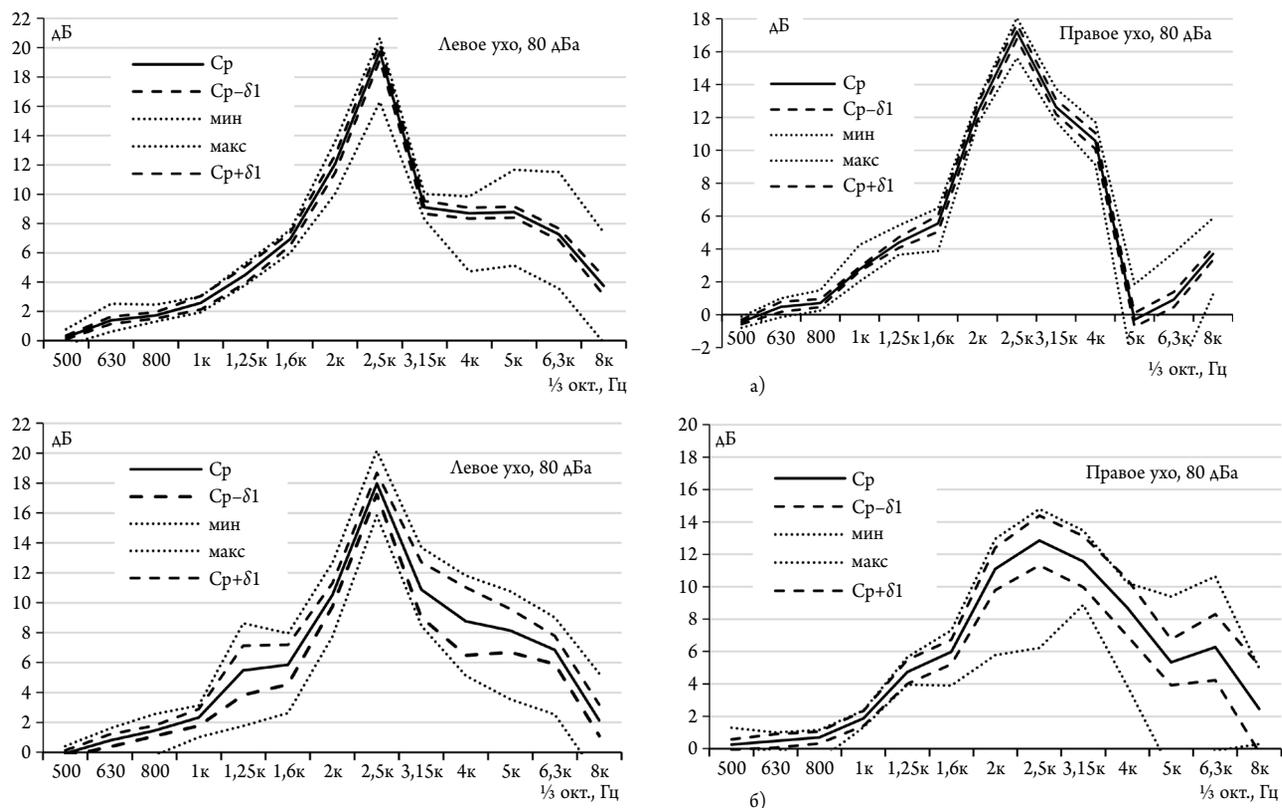


Рис. 4. Усреднённые за 6 серий измерений третьооктавные спектры *TFOE*, максимальные величины стандартного отклонения в каждой серии измерений ($\delta 1$) и максимальный разброс результатов для левого и правого уха а) «спокойного», б) «неспокойного» испытуемых при действии широкополосного шума с уровнем 80 дБа

Fig. 4. The third-octave *TFOE* spectra averaged over 6 series of measurements, the maximum values of the standard deviation in each series of measurements ($\delta 1$) and the maximum spread of results for the left and right ears of a) "calm", б) "restless" subjects under the action of broadband noise with a level of 80 dBa

В примере, приведённом на рисунке 5б, величина *TFOE* на резонансной частоте и в частотной коррекции А практически не меняется, незначительные изменения видны выше резонанса. Были зарегистрированы разнонаправленные изменения *TFOE*, измеренные на резонансной частоте и в частотной коррекции А (рис. 6).

Стандартное отклонение *TFOE* ($\delta 2$) для каждого уровня действующего шума с учётом возможного изменения положения зондовых микрофонов в разных сериях измерений на резонансной частоте для левого уха испытуемых составляло от 0,45 до 1,21 дБ, для правого — от 0,41 до 1,20 дБ, в частотной коррекции А стандартное отклонение ($\delta 2$) для левого уха составляло от 0,26 до 0,73 дБ, для правого — от 0,22 до 0,58 дБ.

Таким образом, в данном исследовании не найдено свидетельств, подтверждающие какие-либо чёткие тенденции в изменениях *TFOE* при различных уровнях воздействия шума на орган слуха.

Связь акустических характеристик наружного уха с размерами ушной раковины и наружного слухового прохода определяли сравнением максимальной величиной *TFOE* и двадцать логарифмов отношения площадей ушной раковины и сечения наружного слухового прохода. Результаты многократных измерений максимальной величины *TFOE* у 11 испытуемых и однократных измерений у 5 испытуемых, размеры площади ушной раковины ($S, pinna, \text{мм}^2$) и сечения слухового прохода ($s, meatus, \text{мм}^2$), а также, величины двадцати логарифмов отношения S/s представлены в таблице 3.

Сравнительный анализ связи акустических характеристик наружного уха испытуемых с размерами ушной раковины и наружного слухового прохода представлен на рисунке 7. Отмечено, что величины *TFOE* на резонансной частоте превышают двадцать логарифмов отношения S/s у 8 испытуемых для левого уха и у 7 для правого из 16 человек.

По этому признаку для линейного регрессионного анализа данных были сформированы две группы испытуемых с данными по правым и две группы с данными по левым ушам (рис. 8). Для наглядности, на рисунке добавлен график линейной зависимости $TFOE/20\lg(S/s)$.

Для результатов регрессионного анализа по данным правых ушей испытуемых в группе с $TFOE < 20\lg(S/s)$ получена высокая достоверность аппроксимации ($R^2=0,8$), в других случаях — менее 0,24.

Практически у всех испытуемых (15 из 17) основной резонанс (рассчитанный по *TFOE*) в левом ухе был выше, чем в правом на величину до 5,9 дБ, в десяти случаях это превышение было достоверно. У двоих испытуемых (№ 12, 16) основной резонанс (рассчитанный по *TFOE*) в правом ухе достоверно был выше, чем в левом.

У восьми из 17 испытуемых основной резонанс (рассчитанный по *TFOE*) в левом ухе был выше, чем в правом на величину до 8,7 дБ, в шести случаях это превышение было достоверно, у одного (№ 12) — основной резонанс в правом ухе достоверно был выше, чем в левом.

Связи этой асимметрии с асимметрией моторных навыков (правша-левша) не выявлено. Так же не обнаружено достоверной связи этой асимметрии с различием

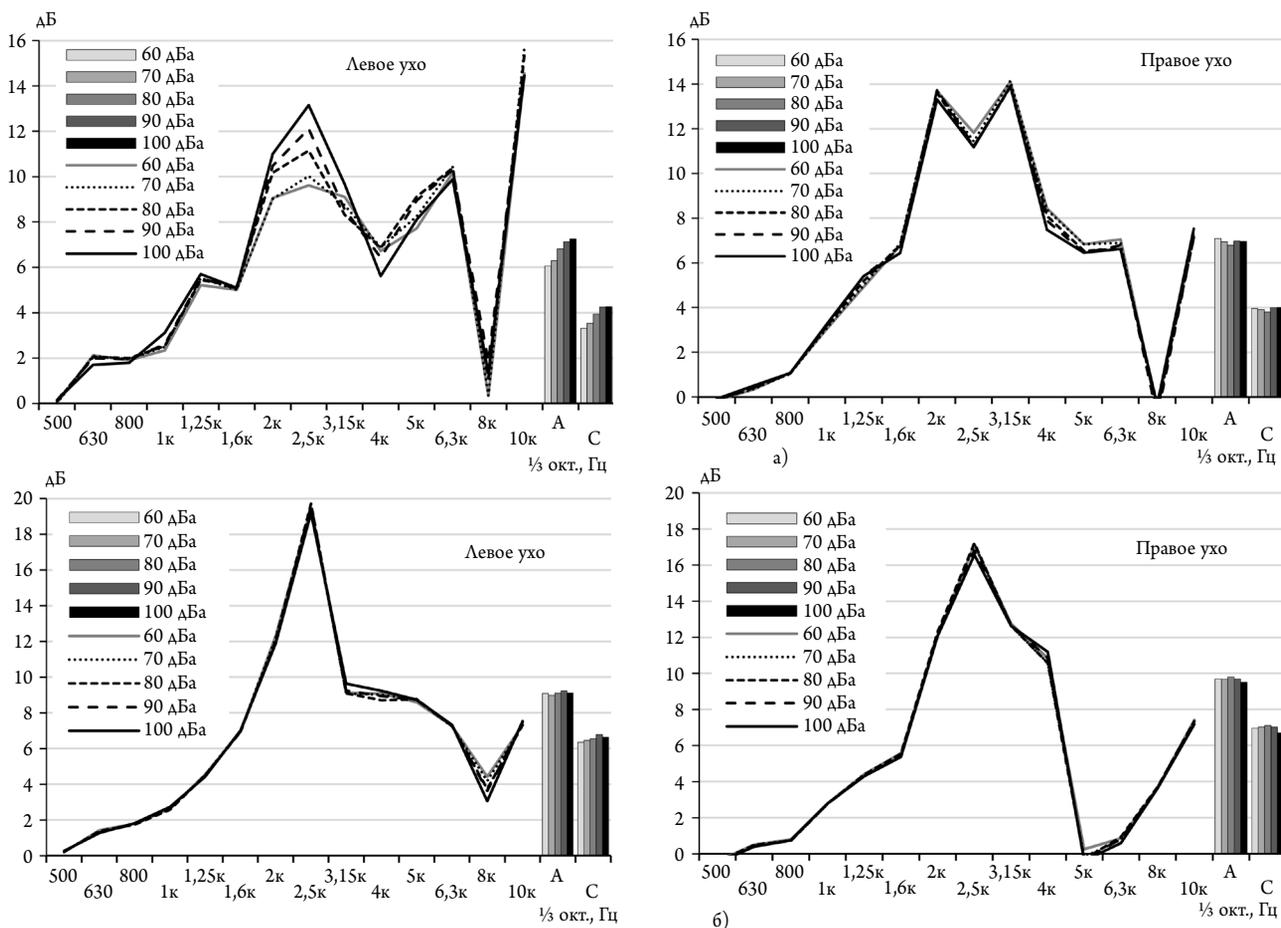
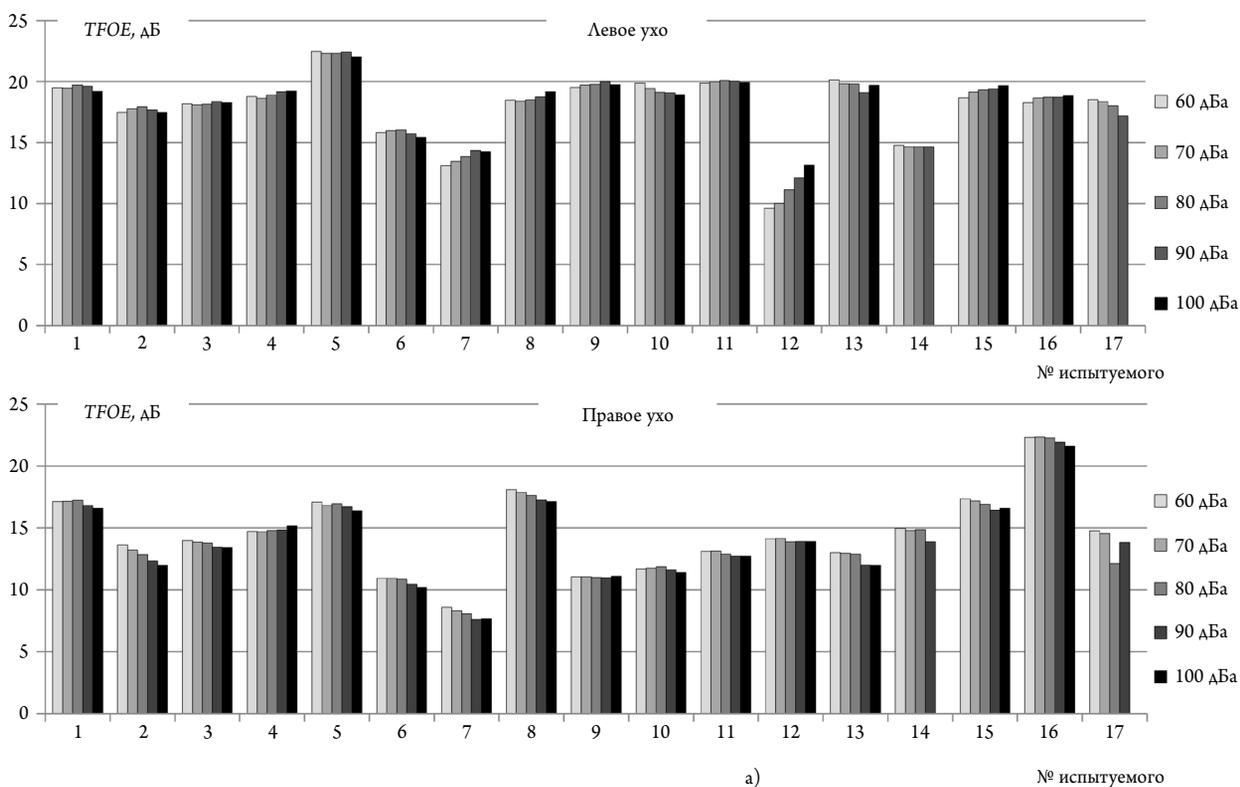


Рис. 5. Примеры третьоктавных спектров TFOE в диапазоне 500–10 000 Гц и величин TFOE, измеренных в частотных коррекциях А и С при действии широкополосного шума с уровнями от 60 до 100 дБА
Fig. 5. Examples of third-octave TFOE spectra in the range 500–10,000 Hz and TFOE values measured in frequency corrections A and C under the action of broadband noise with levels from 60 to 100 dBA



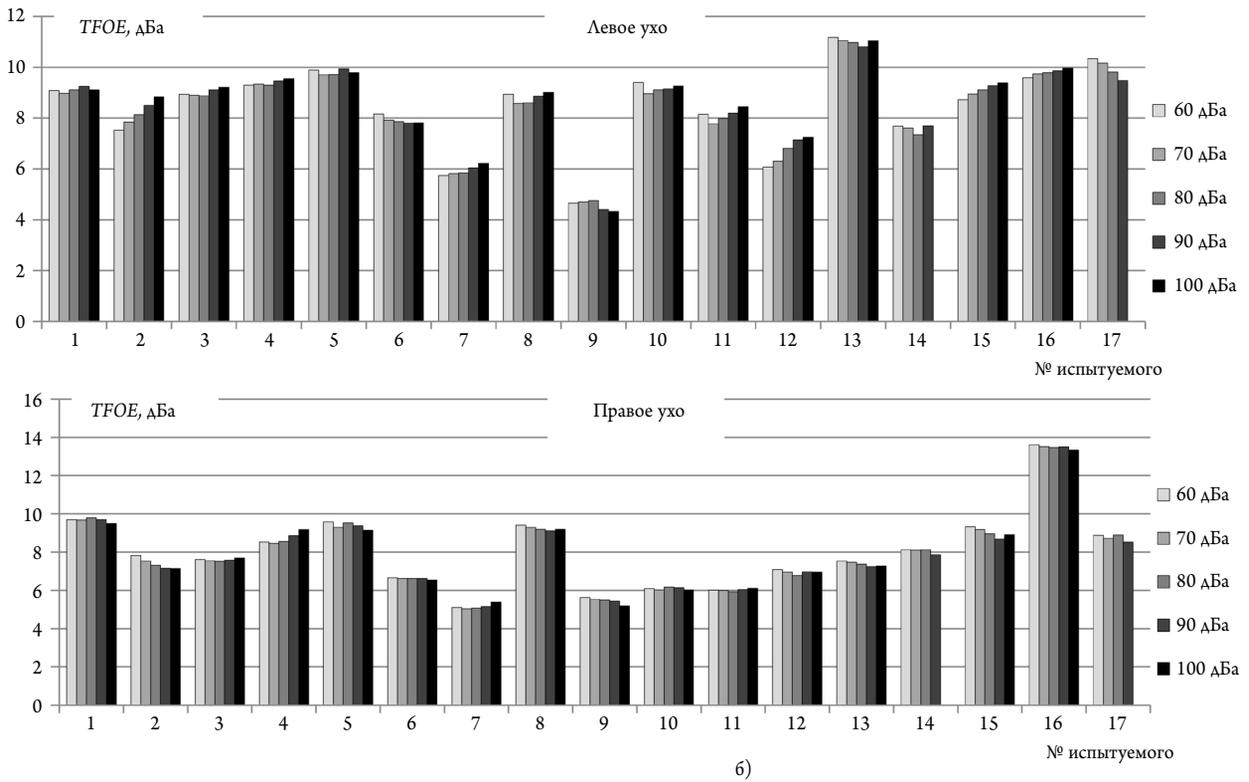


Рис. 6. Изменения TFOE на резонансной частоте (а) и в частотной коррекции А (б) для левого и правого уха каждого испытуемого при действии широкополосного шума с уровнями от 60 до 100 дБa
Fig. 6. Changes in TFOE at the resonant frequency (a) and in the frequency correction A (b) for the left and right ears of each subject under the action of broadband noise with levels from 60 to 100 dBA

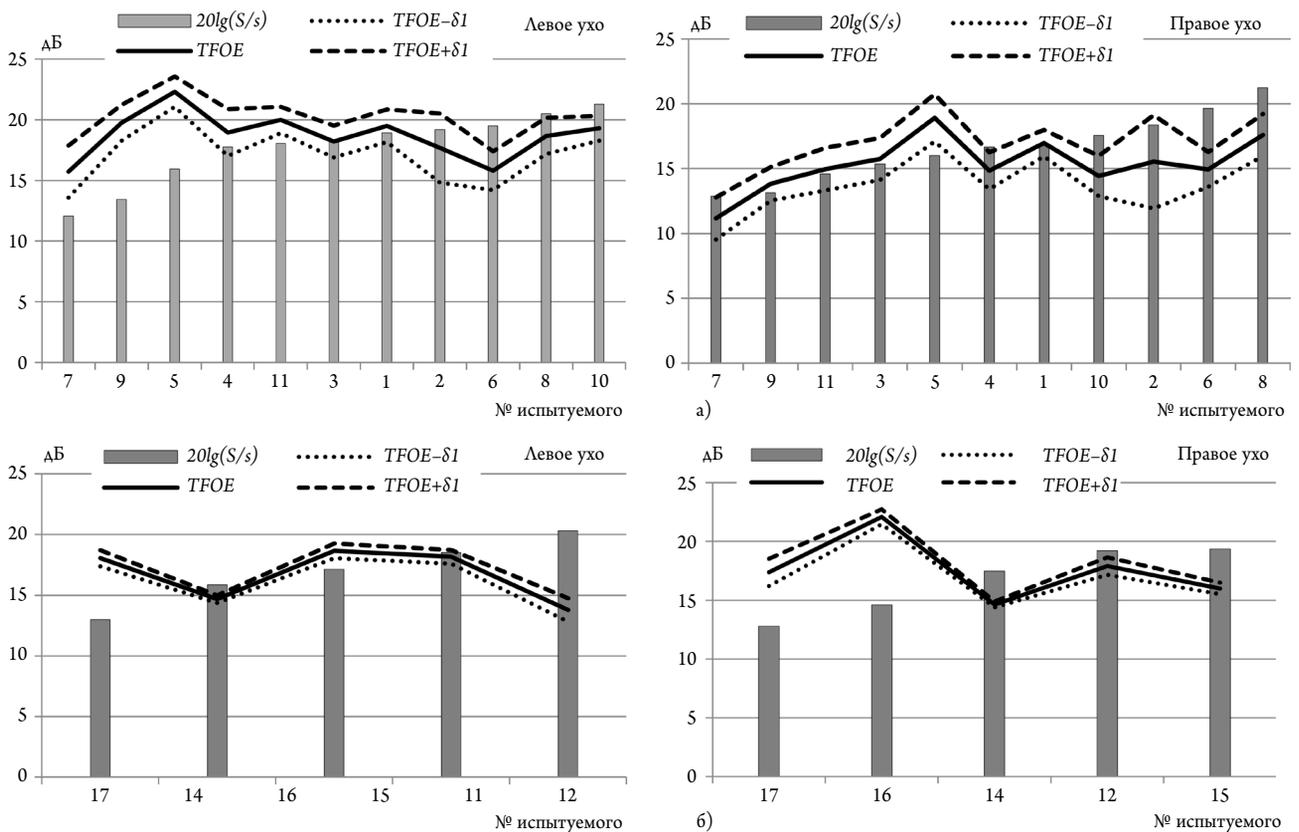


Рис. 7. Сравнение максимальной величины TFOE и двадцати логарифмов отношения S/s по результатам: а) многократных (11 испытуемых) и б) однократных (5 испытуемых) измерений
Fig. 7. Comparison of the maximum value of TFOE and twenty logarithms of the S/s ratio based on the results: a) multiple (11 subjects) and б) single (5 subjects) measurements.

Таблица 3 / Table 3

Размеры площади ушной раковины (S) и сечения наружного слухового прохода (s), величины двадцати логарифмов отношения S/s и максимальные величины $TFOE$ по результатам измерений
The dimensions of the area of the auricle (S) and the section of the external auditory canal (s), the values of twenty logarithms of the S/s ratio and the maximum values of $TFOE$ according to the measurement results

№ испытуемого	Правое ухо испытуемого					Левое ухо испытуемого				
	Результаты многократных измерений									
	$S, pinna, мм^2$	$s, meatus, мм^2$	$20lg(S/s)$	$TFOE$ (макс, дБ)	$\delta 3, дБ$	$S, pinna, мм^2$	$s, meatus, мм^2$	$20lg(S/s)$	$TFOE$ (макс, дБ)	$\delta 3, дБ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	986,5	141,8	16,85	17,0	1,01	1202,7	136,3	18,91	19,5	1,34
2	974,7	117,8	18,35	15,5/12,3*	3,59/2,73**	1149,5	126,2	19,19	17,7	2,85
3	997,7	170,1	15,37	15,8/13,7*	1,62/1,06**	1163,9	140,7	18,35	18,2	1,31
4	1053,0	154,4	16,68	14,8	1,42	927,3	120,3	17,74	18,9	1,93
5	1212,3	191,8	16,01	18,9/16,8*	1,89/1,25**	1157,9	184,7	15,94	22,3	1,25
6	1268,2	131,9	19,66	14,9/12,1*	1,35/0,94**	1086,8	115,4	19,48	15,8	1,60
7	791,1	179,7	12,87	11,2	1,64	649,7	162,2	12,05	15,7/13,8*	2,15/1,64**
8	1353,7	117,6	21,22	17,6	1,62	1312,1	123,8	20,50	18,7	1,48
9	961,9	212,1	13,13	13,8/11,0*	1,30/0,93**	871,9	185,5	13,44	19,8	1,47
10	1068,0	141,5	17,56	14,4/11,7*	1,55/0,98**	1158,7	100,0	21,28	19,3	1,03
11	1239,8	230,9	14,60	15,0/12,9*	1,65/1,06*	982,7	123,2	18,04	20,0	1,09
№ испытуемого	Результаты однократных измерений									
	$S, pinna, мм^2$	$s, meatus, мм^2$	$20lg(S/s)$	$TFOE$ (макс, дБ)	$\delta 1, дБ$	$S, pinna, мм^2$	$s, meatus, мм^2$	$20lg(S/s)$	$TFOE$ (макс, дБ)	$\delta 1, дБ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	1583,2	173,0	19,23	15,9/14,0*	0,75/0,46**	1799,1	173,2	20,33	13,78/11,4**	0,96/0,68**
13	1383,2	—	—	14,4	0,86	1333,3	—	—	19,7	0,52
14	1199,7	160,3	17,48	14,6	0,25	979,9	157,8	15,86	14,7	0,31
15	1160,1	124,9	19,36	16,0	0,48	1003,9	119,3	18,50	18,2	0,56
16	1304,4	242,7	14,61	22,1	0,63	1107,8	153,8	17,15	18,7	0,61
17	657,4	150,9	12,79	16,3/13,9*	1,03/0,69**	780,0	174,7	12,99	18,0	0,67

Примечания: * — в числителе приведены результаты $TFOE$, в знаменателе — $TFOE'$; ** — в числителе приведены результаты $\delta 3$ ($\delta 1$) для $TFOE$, в знаменателе — $\delta 3$ ($\delta 1$) для $TFOE'$.

Note: * — the numerator shows the results of $TFOE$, in the denominator — $TFOE'$; ** — the numerator shows the results of $\delta 3$ ($\delta 1$) for $TFOE$, in the denominator — $\delta 3$ ($\delta 1$) for $TFOE'$.

геометрии правого/левого уха (величиной $20lg(S/s)$ испытуемых.

Для определения связи величин $TFOE$ с состоянием слуха были сформированы две группы по 6 испытуемых-мужчин в каждой в возрасте: 25–33 года и 37–42 года. Эти испытуемые не подвергались профессиональному воздействию шума. Сравнение величин $TFOE$ и $TFOE'$ с порогоми слуха испытуемых на аудиометрических частотах 1,0–4,0 кГц приведены на рисунке 9. Как видно из рисунка, определённой связи величин $TFOE$ с порогоми слуха не наблюдается.

Проведённый регрессионный анализ также не выявил взаимосвязи между порогоми слуха и величинами $TFOE$ у неподверженных профессиональному воздействию шума испытуемых.

Один из 17 испытуемых, 72-летнего возраста, подвергался профессиональному воздействию шума высокого уровня нерегулярно, но длительное время (более 40 лет).

Анализ результатов его аудиограмм показал достоверное различие порогов слуха между правым и левым ухом на частоте 2,0 кГц и в комбинации частот 0,5–3,0 кГц.

Величина $TFOE$ ($TFOE'$) для правого уха этого испытуемого составила $15,8 \pm 1,62$ ($13,7 \pm 1,06$) дБ, для левого — $18,2 \pm 1,31$ дБ, при этом разница величин $TFOE$ для правого и левого уха недостоверна, разница $TFOE'$ для правого уха и $TFOE$ для левого — достоверна. На рисунке 10 представлены результаты сравнения результатов аудиологического исследования этого испытуемого.

Обсуждение. Полученная в результате корреляционного анализа высокая степень корреляции (более 0,9) в большинстве спектральных измерений $TFOE$ даёт основание говорить о хорошей воспроизводимости метода $F-MIRE$. Отмеченное снижение корреляции в случае «неспокойного» поведения испытуемых говорит о том, что при проведении измерений следует обеспечить неподвижность и спокойное поведение испытуемого.

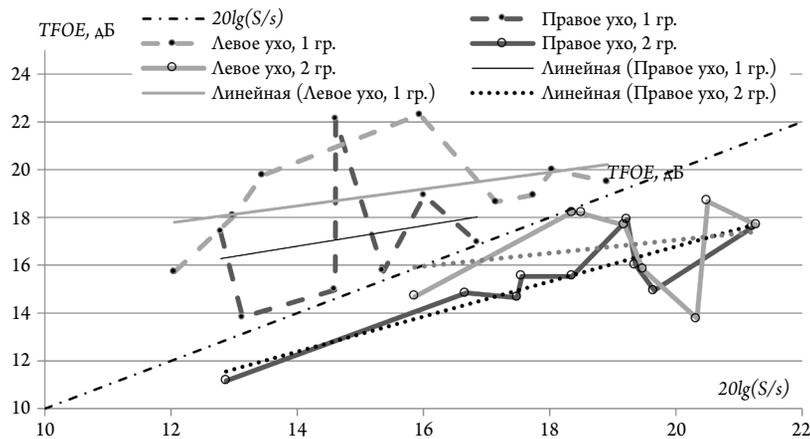


Рис. 8. Линейный регрессионный анализ соотношения максимальной величины $TFOE$ и $20lg(S/s)$ в двух группах испытуемых. Штрихпунктиром обозначена линейная зависимость $TFOE/20lg(S/s)$
Fig. 8. Linear regression analysis of the ratio of the maximum value of $TFOE$ and $20lg(S/s)$ in two groups of subjects. The dotted line indicates the linear dependence of $TFOE/20lg(S/s)$.

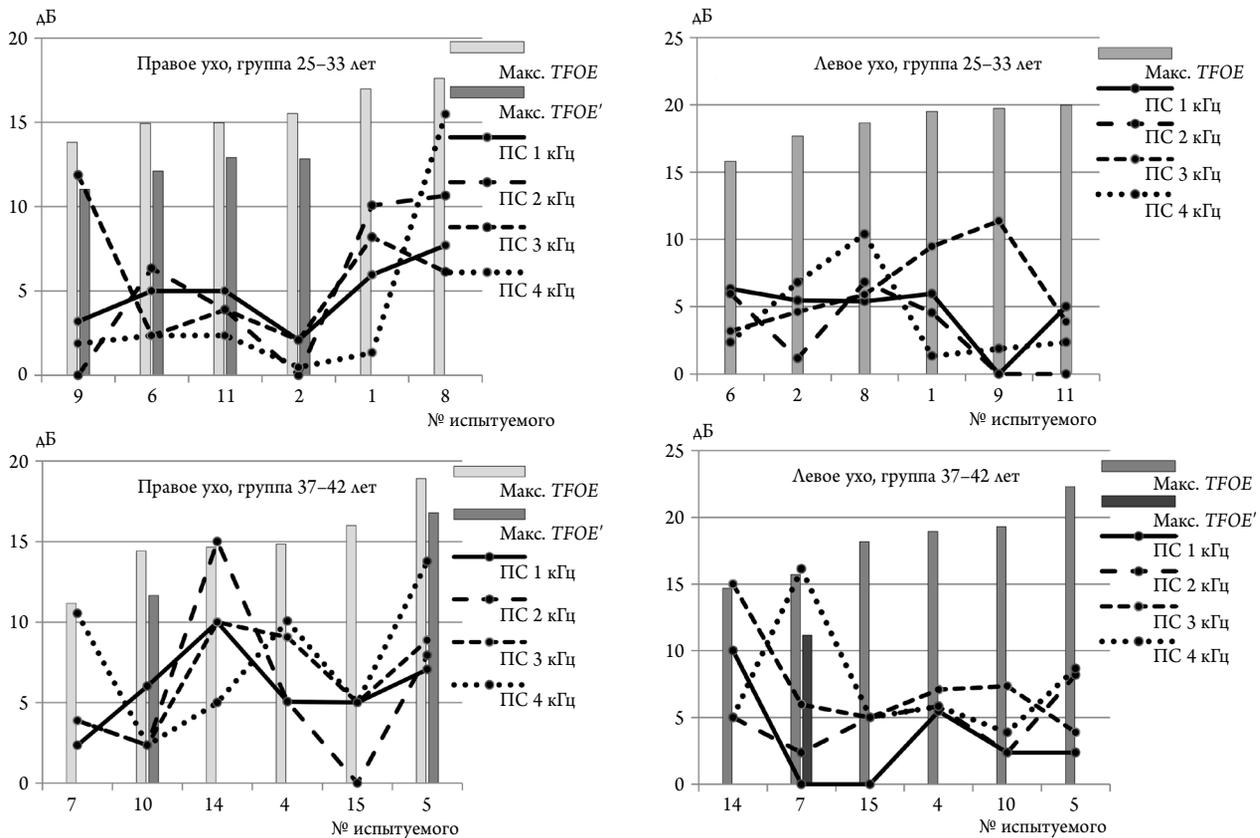


Рис. 9. Сравнение $TFOE$ и $TFOE'$ с порогами слуха на аудиометрических частотах 1,0–4,0 кГц в двух группах испытуемых
Fig. 9. Comparison of $TFOE$ and $TFOE'$ with hearing thresholds at audiometric frequencies of 1.0–4.0 kHz in two groups of subjects

По результатам статистического анализа можно сделать вывод, что наиболее точными являются результаты измерений в третьоктавных полосах частот близких к резонансной. Так, если исключить из анализа результаты «неспокойных» испытуемых (№ 2 и 7), то в диапазоне третьоктавных полос 1,25–4,0 кГц, величины $\delta 1$ и $\delta 2$ не превышают 1,0 дБ, а $\delta 3$ — 2,5 дБ, несмотря на то что $\delta 2$ и $\delta 3$ рассчитывались с учётом возможного изменения положения зондовых микрофонов в разных сериях измере-

ний. Такую точность измерений можно считать вполне удовлетворительной для практических целей.

Анализ величин размаха результатов спектральных измерений $TFOE$ показал, что её величина растёт в третьоктавных полосах частот 4,0 кГц и выше. В этом диапазоне частот может сказываться как интерференция прямой и отражённой от барабанной перепонки звуковой волны, так и неточность позиционирования зондового микрофона в наружном слуховом проходе различных сериях измерений.

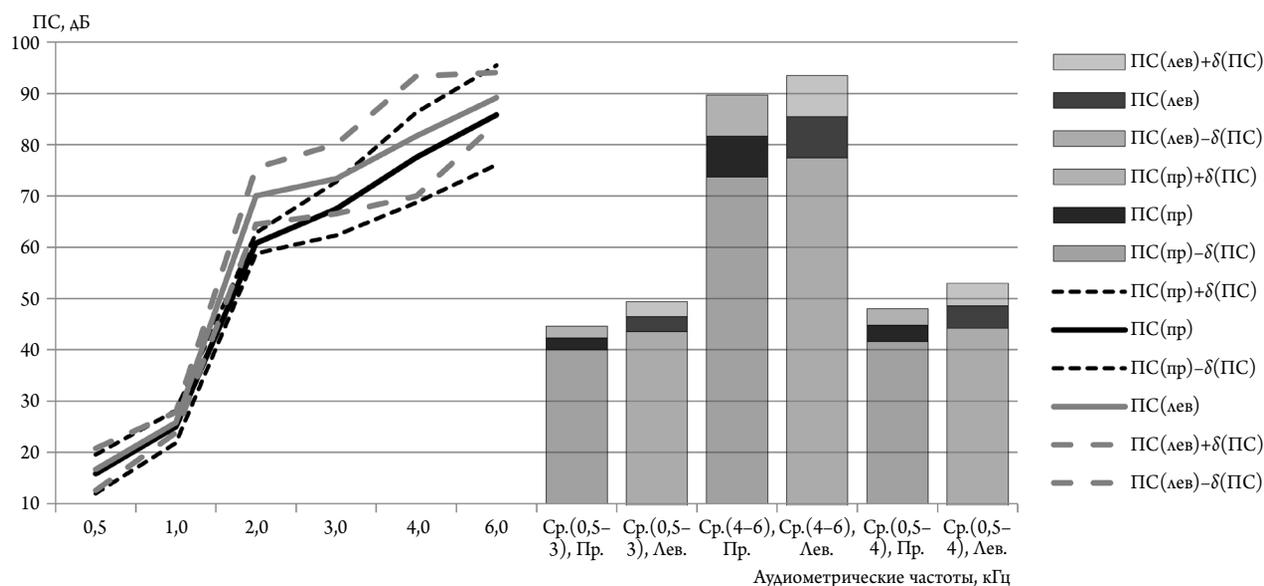


Рис. 10. Пороги слуха на аудиометрических частотах 0,5–6,0 кГц и средние пороги слуха комбинаций частот 0,5–3,0 кГц, 4,0–6,0 кГц и 0,5–2,0 и 4,0 кГц правого и левого уха испытуемого 72 лет, подвергнувшегося профессиональному действию шума

Fig. 10. Hearing thresholds at audiometric frequencies of 0.5–6.0 kHz and average hearing thresholds of frequency combinations of 0.5–3.0 kHz, 4.0–6.0 kHz and 0.5–2.0 and 4.0 kHz of the right and left ears of a 72-year-old subject exposed to professional noise

Обобщая данные статистического анализа и анализа величин разброса результатов, можно сделать вывод, что наиболее точные и надёжные результаты спектральных измерений *TFOE* получаются в диапазоне третьоктавных полос 1,25–3,15 кГц и в частотной коррекции А. Что вполне совпадает с результатами исследований [5, 9–12].

Повышение степени точности измерений звукового давления методом *F-MIRE* можно достичь совершенствованием приспособлений фиксации зондового микрофона в наружном слуховом проходе. Кроме того, в лабораторных исследованиях необходимо контролировать поведение и обеспечить неподвижность испытуемых во время измерений.

В производственных исследованиях контроль поведения работников осуществить практически невозможно. Для обеспечения приемлемой точности измерения, например, для оценки эффективности СИЗОС на рабочем месте, разрабатываются специальные процедуры и приспособления для измерений, способы обработки полученных данных [17]. В связи с этим можно предложить моделирование выполнения рабочих функций с учётом обеспечения качества измерений.

Как отмечалось, ожидаемых изменений спектров *TFOE* при действии шума разных уровней мы не зарегистрировали, хотя в отдельных сериях измерений у некоторых испытуемых определённая тенденция наблюдалась.

Возможно для определения таких изменений нужно применять более подробный, чем третьоктавный, анализ спектра и предусмотреть более точную фиксацию зондового микрофона в наружном слуховом проходе для получения более представительных результатов. Позиционирование конца зонда в слуховом проходе должно быть на одинаковом расстоянии от барабанной перепонки для стандартизации условий интерференции прямой и отражённой от барабанной перепонки звуковой волны.

Учитывая, что извилистая форма наружного уха приводит к сложной структуре акустических импедансов и дифракций, которые изменяют спектральный состав звуков

и то, что относительно небольшие различия в морфологических характеристиках наружного уха могут привести к значимым для восприятия различиям в спектре звукового давления в слуховом проходе [18], мы применили метод измерения размеров наружного уха для сравнения максимальной величины *TFOE* и двадцати логарифмов отношения площадей ушной раковины и сечения наружного слухового прохода в том месте, где находился микрофонный зонд.

Как видно, половина результатов сравнения максимальной *TFOE* (у 8 испытуемых из 16 по данным 8 левым и 8 правым ушей) довольно близки к величинам $20 \lg(S/s)$, при сравнении максимальной *TFOE'* количество близких сравнений по левым ушам увеличилось до 9 испытуемых, а по правым — уменьшилось до 5 испытуемых. Однако, мы не смогли обнаружить связь различий *TFOE* испытуемых правого и левого уха на частоте основного резонанса с различием геометрии правого/левого уха и с асимметрией моторных навыков.

Возможное влияние интерференции прямой и отражённой от барабанной перепонки звуковой волны на частоте 2,5 кГц ($\lambda/4 \approx 34$ мм) в такой степени (до 6 дБ и более) в этом случае маловероятно, так как расстояние от конца микрофонного зонда до барабанной перепонки было примерно 10–15 мм у разных испытуемых. А применённый метод измерения площади ушной раковины не позволяет корректно определить величину её «эффективной» акустической площади из-за сложности формы.

Но различия *TFOE* правого и левого уха существуют. Эти различия могли быть причиной разных показателей эффективности однотипного СИЗОС на правом и левом ухе работников, обнаруженные в ряде исследований [17].

Отсутствие определённой взаимосвязи между порогом слуха и величинами *TFOE* у неподверженных профессиональному воздействию шума испытуемых было ожидаемо, так как у эти испытуемые не подвергались какому-либо фактору, однонаправленно с шумом влияющему на состояние слуха.

Зарегистрированное достоверное различие порогов слуха на частоте 2,0 кГц и в комбинации частот 0,5–3,0 кГц в правом и левом ухе 72-летнего испытуемого возможно связано с различием частотных характеристик TFOE. При действии широкополосного шума равного уровня на оба уха этого испытуемого уровень звука А в наружных слуховых проходах левого и правого уха, из-за различий TFOE, различался на 2,4 дБ.

Расчитанные по ISO 1999:2013 уровни стажевой экспозиции 40 лет для таких порогов слуха, с учётом возрастных изменений, рассчитанных по ISO 7029:2017, для перцентилей 32% составили 95,9 и 97,7 дБА для правого и левого уха соответственно (разница 1,8 дБ). Перцентиль 32% был выбран по минимальному различию расчётных по ISO 7029:2017 возрастных потерь и среднего порога слуха по аудиометрии на частоте 500 Гц.

Следует отметить, что известные нам исследования, направленные на совершенствование метода позиционирования зондового микрофона и определения звукового давления вблизи барабанной перепонки и вдоль наружного слухового прохода, проводились с использованием чистых тонов или частотно модулированного синусоидального сигнала. Исследователи акустической эффективности СИЗОС в условиях производства имели дело с шумом различной спектральной плотности и различного распределения мгновенных величин звукового давления.

В данном исследовании применялся широкополосный шум от генератора «розового» шума с распределением мгновенных величин звукового давления близких к гауссовому.

Заключение. Настоящее исследование представляет собой попытку оценить возможность метода MIRE (F-MIRE), его воспроизводимость и точность. Результаты, представленные в статье, показывают потенциал метода для анализа влияния шума на слух и понимание влияния различных факторов на точность измерений звукового давления в наружном слуховом проходе. В перспективе применение этого метода важно, например, для обоснования мер персонализированной профилактики нейросенсорной туго-

ухости, измерения акустической нагрузки на членов лётных экипажей воздушных судов (вместо расчётных данных), медицинского профотбор в «шумные» профессии при проведении периодических медицинских осмотров, оценки индивидуального профессионального риска и др.

Наиболее информативными показателями передаточной функции наружного уха является величина TFOE на частоте первого резонанса, в третьоктавных полосах частот 500–4000 Гц и в частотной коррекции А. Для измерений TFOE возможно применять внешний шум, в том числе производственный, достаточно плоский в этом диапазоне частот с исключением составляющих ударного характера.

Во время измерений необходимо обеспечивать неподвижность испытуемого, для надёжного позиционирования микрофонного зонда в наружном слуховом проходе. Длительность измерения 60 с при стабильном внешнем шуме порядка вполне достаточна. Повышение степени точности измерений звукового давления методом F-MIRE можно достичь совершенствованием приспособлений фиксации зондового микрофона в слуховом проходе.

При измерениях акустической эффективности противошумных наушников методом F-MIRE с открытым ухом и при надетом наушнике, т. е. относительных измерениях, необходимо обеспечить неизменность позиции зонда в наружном слуховом проходе при надевании и ношении наушника. При измерениях на рабочих местах целесообразно моделировать выполнение рабочих функций для обеспечения качества измерений.

Исследования по определению связи величин TFOE с геометрией наружного уха и с состоянием слуховой функции, различий характеристик правого и левого уха испытуемых требуют использования более точных методов измерения размеров (построение 3D моделей) наружного уха, и продолжения исследований на испытуемых, подверженных профессиональному действию шума, для сбора индивидуализированных данных в объёмах, достаточных для статистического анализа.

Список литературы (пп. 1–15, 17, 18 см. References)

16. Прокопенко Л.В., Булгакова М.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. Значение передаточной функции наружного уха для оценки эффективности СИЗ органа слуха. *Медицина труда и промышленная экология*. 2021; 61(10): 655–661. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-10-655-661>

References

- Berger E.H., Voix J., Kieper R.W. Methods of Developing and Validating a Field-MIRE Approach for Measuring Hearing Protector Attenuation. <https://www.researchgate.net/publication/257128829>
- Nassrallah F.G., Giguere C., Dajani H.R., Ellaham N.N. Comparison of direct measurement methods for headset noise exposure in the workplace. *Noise and Health*. 2016; 18(81): 62–77. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.178479>
- Sullivan R.F. Probe tube microphone placement near the tympanic membrane. *Hearing Instruments*. 1988; 39(7): 43–50.
- Johnson S.E., Nelson P.B. Real ear measures of auditory brainstem response click spectra in infants and adults. *Ear and Hearing*. 1991; 12(3): 180–183.
- Traynor R.M., Ackley R.S., Wiersbowski L. Probe tube microphone measurement of hearing protection devices. *Hearing Instruments*. 1989; 40(2): 32, 33, 60.
- Searchfield G.D., Purdy S.C. Probe microphone placement for real ear measurement: Update on a simple acoustic method. *American Journal of Audiology*. 1997; 6(2): 49–54.
- Berger E.H. *Introducing F-MIRE testing: background and concepts (Report EAR06-29/HP)*. Indianapolis, IN, USA: Aeareo; 2007. <https://clck.ru/3BWraB>
- Voix J., Hager L.D. Individual Fit Testing of Hearing Protection Devices. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*. 2009; 15(2): 211–219. <https://doi.org/10.1080/10803548.2009.11076802>
- Hellstrom P., Axelsson A. Miniature microphone probe tube measurements in the external auditory canal. *The Journal of the Acoustical Society of America. J. Acoust. Soc. Am.* 1993; 93: 907–919. <https://doi.org/10.1121/1.405452>
- McCreery R.W., Pittman A., Lewis J., Neely S.T., Stelmachowicz P.G. Use of forward pressure level to minimize the influence of acoustic standing waves during probe-microphone hearing-aid verification. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2009; 126: 15–24. <https://doi.org/10.1121/1.3143142>

11. Hiipakka M. Estimating pressure at the eardrum for binaural reproduction. *Computer Science*. 2012 <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5946397>
12. Dirks D.D., Ahlstrom J.B., Eisenberg L.S. Effects of probe insertion depth on real ear measurements. *Otolaryngology — Head and Neck Surgery*. 1994; 110(1): 64–74.
13. Dirks D.D., Kincaid G.E. Basic considerations of ear canal probe measurements. *Ear and Hearing*. 1987; 8(5): 605–675.
14. Hawkins D.B., Alvarez E., Houlihan J. Reliability of three types of probe tube microphone measurements. *Hearing Instruments*. 1991; 42: 14–16.
15. Hawkins D.B., Mueller H.G. Procedural considerations in probe microphone measurement. In H.G. Mueller, D.B. Hawkins., J.L. Northern (Eds.), *Probe microphone measurements*. San Diego: Singular; 1992: 67–91.
16. Prokopenko L.V., Bulgakova M.V., Courierov N.N., Lagutina A.V. Transfer function of open ear importance in assessment of hearing protection devices noise reduction. *Med. truda i prom. ekol.* 2021; 61(10): 655–661. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-10-655-661>
17. Nélisse H., Gaudreau M.-A., Boutin J., Voix J., Laville F. Measurement of Hearing Protection Devices Performance in the Workplace during Full-Shift Working Operations. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2012; 56(2): 221–232. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer087>
18. Carlile S. The plastic ear and perceptual relearning in auditory spatial perception. *Front. Neurosci.* 2014; 8: 237. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00237>

Информация об авторах:

- Прокопенко Людмила Викторовна** главный научный сотрудник ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», д-р мед. наук, профессор.
E-mail: prokopenko@irioh.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7767-8483>
- Булгакова Мария Викторовна** врач-оториноларинголог консультативно-поликлинического отделения клиники профессиональных и производственно обусловленных заболеваний ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова».
E-mail: bulgakova@irioh.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9631-0000>
- Курьеров Николай Николаевич** вед. науч. сотр. лаборатории физических факторов ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», канд. биол. наук.
E-mail: courierov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7064-5849>
- Лагутина Алла Владимировна** ведущий научный сотрудник лаборатории физических факторов ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», канд. мед. наук.
E-mail: alagutina@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7177-1350>

Information about the authors:

- Ljudmila V. Prokopenko** Chief Researcher, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Dr. Sci. (Med.), Professor.
E-mail: prokopenko@irioh.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7767-8483>
- Maria V. Bulgakova** Otorhinolaryngologist, Consultative Outpatient Department of the Clinic of Occupational and Work-Related Diseases, Izmerov Research Institute of Occupational Health.
E-mail: bulgakova@irioh.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9631-0000>
- Nikolay N. Kuryerov** Leading Researcher of the Laboratory of Physical Factors, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Cand. of Sci. (Biol.).
E-mail: courierov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7064-5849>
- Alla V. Lagutina** Leading Researcher of the Laboratory of Physical Factors, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Cand. Sci. (Med.).
E-mail: alagutina@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7177-1350>