

Ключевые слова: сенсоневральная тугоухость, монауральное слухопротезирование, направленность микрофона, разборчивость речи в шуме, разные акустические ситуации

Boboshko M. ✉, Berdnikova I., Maltseva N.

Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia

Effect of Hearing Aid Microphone Directionality on Speech Intelligibility in Noise

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: study concept and design, editing, processing, text writing – Boboshko M.; study concept and design, editing, material collecting, text writing – Berdnikova I.; study concept and design, editing, material collecting, processing, text writing – Maltseva N.

The work was carried out within the framework of the state assignment (state registration number in State Register of Scientific Research, Experimental Design and Experimental Technology Works: 124020600057-3).

Submitted: 28.05.2024

Accepted: 15.10.2024

Contacts: boboshkom@gmail.com

Abstract

Introduction. Poor speech intelligibility in noise is a major challenge in hearing aid (HA) users. Various technological innovations have been proposed to overcome this issue, one of which is the option of changing HA microphones directionality to match the sound environment.

Purpose. To evaluate the effect of HA microphones directionality on speech intelligibility in various acoustic situations in presence of competing interference.

Materials and methods. 28 experienced HA users aged 29 to 86 years with bilateral chronic sensorineural hearing loss of moderate to moderately severe degree were examined. The intelligibility of polysyllabic words was evaluated with activated omnidirectional, adaptive and fixed microphone directionality in conditions of unilateral HA using with different spatial location of the target signal and interference (traffic noise or bubble noise).

Results. The speech intelligibility in traffic noise was significantly higher than in bubble noise with any microphone directionality. Both omnidirectional and adaptive microphone options were the most effective when speech signals were presented from the side of HA while interference was presented from the front. With activated fixed microphone directionality, the maximal intelligibility was obtained when presenting speech frontally, and interference from the side of HA. There was a statistically significant correlation between speech intelligibility and hearing thresholds in all acoustic situations and with activated microphone directionality of any type.

Conclusion. The speech intelligibility in noise in unilateral HA depends on the acoustic situation (amplitude-frequency characteristics of the background noise, as well as the spatial location of the interference and the useful signal), the patient's auditory function and, to a lesser extent, on the type of microphone directionality.

Keywords: sensorineural hearing loss, unilateral hearing aid, microphone directionality, speech perception in noise, various acoustic situations

■ ВВЕДЕНИЕ

Плохая разборчивость речи в шумной обстановке является основной проблемой слухопротезирования. Для ее решения предлагаются разные технологические инновации, одной из которых является возможность изменения направленности микрофонов слуховых аппаратов (СА) в соответствии со звуковой обстановкой. Всенаправленный (или ненаправленный) микрофон имеет небольшие размеры, обеспечивает высокое качество звука, хорошую передачу низких частот, демпфирование вибрации и низкий уровень собственного шума. Недостатком микрофона этого типа является то, что он имеет одинаковую чувствительность к звукам, поступающим со всех сторон, и поэтому эффективен преимущественно в тихой обстановке.

Направленные микрофоны имеют два разных звуковых входа: передний и задний (тыловой), что обеспечивает возможность снижения их чувствительности к звукам, идущим с разных направлений, за счет улучшения отношения сигнал/шум. Они могут работать в режимах фиксированной и адаптивной направленности. Алгоритм фиксированной направленности обеспечивает высокую чувствительность к сигналам, поступающим фронтально, и эффективен, когда источник речи находится непосредственно перед человеком. Адаптивный алгоритм делает возможным автоматическое переключение в разные режимы направленности синхронно с изменением акустической ситуации, что позволяет добиться улучшения отношения сигнал/шум с минимальными потерями в слышимости звуков, приходящих с разных сторон. Эффективность направленных микрофонов изучалась многими авторами, показавшими их преимущества в сравнении с всенаправленными микрофонами, однако в повседневной жизни пациенты далеко не всегда ощущают пользу от их применения [1, 2]. В ряде исследований проводился анализ эффективности этой функции при использовании СА пациентами разных возрастных групп, в том числе детьми, изучались особенности применения таких СА в городских и сельских условиях [3, 4]. Оценивалось влияние микрофонов разной направленности не только на разборчивость речи, но и на локализационные и когнитивные способности, рабочую память [4, 5]. В качестве объективного показателя эффективности микрофонов той или иной направленности предлагалось использовать как психоакустические, так и электрофизиологические методы, в частности регистрацию слуховых вызванных потенциалов [6]. С учетом того, что в отечественной литературе работ, посвященных влиянию направленности микрофонов на результаты слухопротезирования, практически нет, а результаты зарубежных исследований по оценке разборчивости речи у пользователей СА с микрофонами разной направленности оказались противоречивыми, требуется дальнейшее изучение этого вопроса.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценить влияние направленности микрофонов слуховых аппаратов на разборчивость речи в различных акустических ситуациях в присутствии конкурирующей помехи.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследовано 28 человек (19 женщин и 9 мужчин) с двусторонней хронической сенсоневральной тугоухостью II–III степени в возрасте от 29 до 86 лет ($59,9 \pm 14,1$ года).

Все пациенты были опытными пользователями заушных СА одного класса, протезированными монаурально. Контрольную группу составили 10 лиц с нормальным слухом (7 женщин и 3 мужчин) в возрасте от 33 до 53 лет ($39,5 \pm 6,1$ года), обследованных в свободном звуковом поле для получения нормативных показателей. Базовое обследование включало сбор анамнеза, осмотр лор-органов, тональную пороговую аудиометрию, импедансометрию, оценку разборчивости односложных слов в тишине. Кроме того, пациентам с тугоухостью проводили тесты для оценки обработки слуховой информации в центральных отделах слуховой системы: тест обнаружения паузы, тест чередующейся бинаурально речью, дихотический числовой тест [7]. Эти исследования выполняли в наушниках TDH39 на комфортном уровне громкости с использованием клинического аудиометра AD229e (Interacoustics, Дания), аудиоплеера и дисков с записями теста обнаружения паузы и речевых тестов. Критерием включения в исследование было отсутствие у пациентов центральных слуховых расстройств.

Изучали влияние на разборчивость речи активации в СА опций адаптивного, фиксированного и всенаправленного микрофона в различных акустических ситуациях. Исследования проводили в одном заушном цифровом программируемом СА с бесканальным процессором, адаптивной системой шумоподавления и возможностью программно изменять направленность микрофона. Эффективность разной направленности микрофонов оценивали при проведении речевой аудиометрии в свободном звуковом поле с использованием тестовых таблиц разносложных слов [8]. Речевой материал и помеху предъявляли с двух звуковых колонок, одну из которых устанавливали спереди от испытуемого на расстоянии 1 м на уровне его головы, а вторую – со стороны СА на таком же расстоянии под углом 90° относительно первой. На рис. 1 представлены 5 акустических ситуаций, в которых осуществлялось предъявление речевого сигнала и помехи: 1) речь и помеха спереди; 2) речь спереди, а помеха сбоку со стороны СА; 3) речь со стороны СА, а помеха спереди; 4) помеха с двух колонок (спереди и сбоку), а речь с одной колонки со стороны СА; 5) помеха с двух колонок (спереди и сбоку), а речь с одной колонки спереди от испытуемого. Интенсивность речевого сигнала составляла 65 дБ УЗД, отношение сигнал/шум +6 дБ. В качестве помехи использовали транспортный шум и многоголосие.

Дизайн исследования предполагал три визита пациента, в ходе которых выполнялись: 1) комплексная оценка состояния периферического и центрального звеньев слухового анализатора; 2) оценка разборчивости разносложных слов в тишине и на фоне многоголосия в разных акустических ситуациях с использованием трех разных опций направленности микрофона; 3) оценка разборчивости разносложных слов

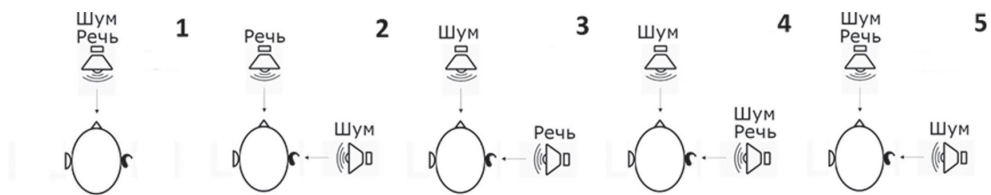


Рис. 1. Акустические ситуации для предъявления речевого сигнала и помехи
Fig. 1. Acoustic situations for speech signal and interference presentation

на фоне транспортного шума в разных акустических ситуациях с использованием трех разных опций направленности микрофона. Для исключения эффекта тренировки выбор акустических ситуаций и предъявляемой помехи осуществлялся в случайном порядке.

Для статистического анализа параметров распределения использовали стандартные показатели: объем выборки, среднее значение, стандартное отклонение. Достоверность различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента. Статистические решения принимались на 5%-ном уровне значимости ($p < 0,05$). Для оценки взаимосвязи между данными выборки использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r).

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние пороги слуха у обследованных пациентов на речевых частотах (0,5–4 кГц) на протезированном ухе составили $50,5 \pm 9,4$ дБ нПС, на непротезированном – $57,0 \pm 11,6$ дБ нПС. Результаты теста обнаружения паузы у 17 пациентов (61%) были в пределах нормальных значений: порог обнаружения паузы не превышал 20 мс. При оценке бинаурального взаимодействия с использованием теста чередующейся бинаурально речи у 24 пациентов (86%) результаты не отличались от нормальных значений. Показатели дихотического числового теста были больше или равны 80% у 15 человек (54%), что считается нормальным показателем для сенсоневральной тугоухости периферического генеза. У 13 пациентов (46%) они не превышали 70%, что свидетельствовало о возможных нарушениях в центральных отделах слуховой системы. Однако у всех пациентов нарушения выявлялись не более чем в одном из тестов, что не могло быть четким критерием для постановки диагноза центрального слухового расстройства [7].

Исследования в свободном звуковом поле показали, что все пациенты в СА достаточно хорошо разбирали речь в тишине ($94,8 \pm 7,9\%$), но достоверно хуже ($p < 0,01$), чем лица с нормальным слухом ($99,5 \pm 1,3\%$). Наблюдалась корреляционная зависимость разборчивости речи в тишине от результатов дихотического числового теста, выявляющего нарушения межполушарных связей ($r = 0,52$).

В условиях помехи разборчивость в любых акустических ситуациях была достоверно хуже, чем в тишине ($p = 0,04 \div 0,0001$) и в контрольной группе ($p = 0,002 \div 0,0001$).

Отмечена более высокая разборчивость речи для любой опции направленности микрофонов при ее предъявлении на фоне транспортного шума, чем при ее предъявлении на фоне многоголосия (рис. 2). При активации адаптивного микрофона эти различия были достоверны для всех акустических ситуаций ($p < 0,05 \div 0,001$). При активации фиксированного микрофона различия были достоверны ($p < 0,05$) для акустических ситуаций 3, 4 и 5, а при активации всенаправленного микрофона различия были достоверны ($p < 0,05$) только в акустических ситуациях 2, 4 и 5.

В транспортном шуме (рис. 2А) тип направленности микрофона мало влиял на разборчивость речи. Наблюдалась лишь тенденция к улучшению разборчивости речи при активации адаптивного микрофона в акустической ситуации 5 (при предъявлении речи спереди, а помехи с двух колонок) по сравнению с всенаправленным и фиксированным микрофоном. Наибольшая разборчивость при активации микрофона любого типа направленности фиксировалась в акустической ситуации 3, когда речевой сигнал и помеха были пространственно разнесены, а речь подавалась со

стороны СА: разборчивость при этом составила $86,4 \pm 1,9\%$ и была достоверно лучше ($p=0,02 \div 0,001$) по сравнению со сложными акустическими ситуациями, когда помеха подавалась или одновременно из двух источников, или со стороны СА (ситуации 2, 4 и 5). В условиях транспортного шума всенаправленная и фиксированная опции микрофона были наиболее эффективны в акустических ситуациях 1, 2 и 3; а адаптивная – в ситуациях 3, 4 и 5 (рис. 2А). В целом независимо от направленности микрофона разборчивость речи на фоне транспортного шума была достаточно высокой в любых акустических ситуациях, варьируя от 67 до 88% (ср. знач. $78,4 \pm 6,1\%$).

В условиях многоголосия (рис. 2В) регистрировались значительные колебания разборчивости в зависимости от акустической ситуации и от типа направленности микрофона. Всенаправленная и адаптивная опции были наиболее эффективны в акустической ситуации 3, в которой регистрировались наибольшие значения разборчивости ($80,2 \pm 20,7\%$ при активации всенаправленного микрофона и $78,2 \pm 20,8\%$ при активации адаптивного микрофона), что было достоверно больше, чем в ситуациях 2, 4 и 5 ($p=0,01 \div 0,0001$). При использовании микрофона фиксированной направленности такой тенденции не наблюдалось, а наибольшая разборчивость регистрировалась в ситуации 2 (при предъявлении речи фронтально, а помехи со стороны СА), достоверно отличаясь от разборчивости в ситуации 4, когда помеха предъявлялась с двух сторон ($p=0,02$). В акустических ситуациях 1 и 5 разборчивость речи была одинаковой при любой направленности микрофона (рис. 2В).

Отмечалась статистически значимая корреляционная зависимость разборчивости речи во всех акустических ситуациях и при активации любого типа направленности микрофона от порогов слуха на протезированном ухе ($r = -0,6 \div -0,7$). При использовании многоголосия почти во всех акустических ситуациях и со всеми вариантами направленности микрофонов отмечалась корреляция с порогом на непротезированном ухе ($r = -0,4 \div -0,6$). Исключение составили только ситуация 3 (при пространственном разнесении целевого сигнала и помехи) в случае активации

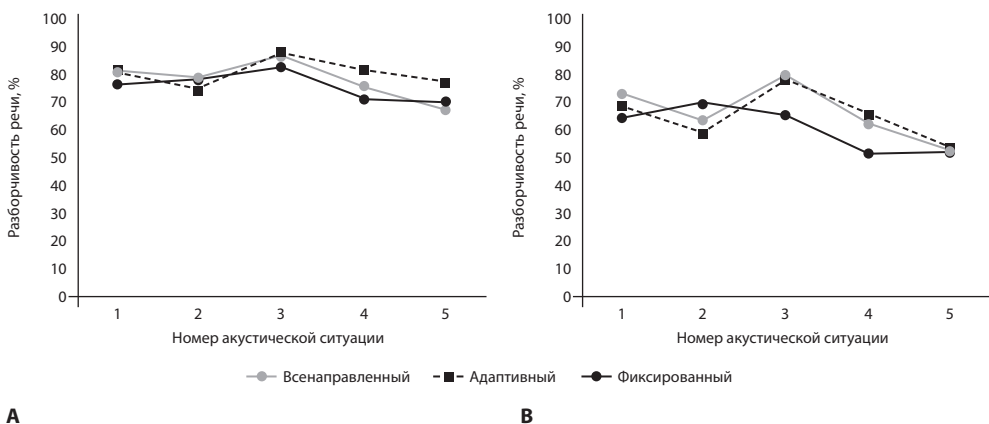


Рис. 2. Разборчивость речи при активации всенаправленной, адаптивной и фиксированной направленности микрофонов в разных акустических ситуациях при предъявлении транспортного шума (А) и многоголосия (В)
Fig. 2. Speech intelligibility with activated omnidirectional, adaptive and fixed microphone directionality in different acoustic situations when presenting traffic noise (А) and bubble noise (В)

всенаправленного микрофона и ситуация 2 при активации фиксированной направленности микрофона. В условиях транспортного шума такая корреляция была менее выраженной.

Следует отметить корреляцию речевой разборчивости в транспортном шуме с разборчивостью односложных слов на непротезированном ухе, предъявляемых в тишине через головные телефоны. Эта корреляция была характерна для любой направленности микрофона в акустических ситуациях 1, 2 и 5 ($r=0,4\div 0,5$), когда речь на фоне помехи подается фронтально. В ситуациях 3 и 4 (при предъявлении речи со стороны СА, а транспортного шума спереди) такая корреляция не выявлялась ни для одного из типов направленности микрофона. В условиях многоголосия она выявлялась только в тех случаях, когда речь предъявлялась фронтально, а помеха присутствовала со стороны СА: в акустической ситуации 2 при активации адаптивной и фиксированной направленности микрофона и в ситуации 5 – только при активации адаптивной направленности.

Как показало проведенное исследование, разборчивость речи в шуме при мо-науральном слухопротезировании зависела от характера конкурирующей помехи (при использовании транспортного шума она была достоверно выше, чем в условиях многоголосия при любой направленности микрофона), а также от пространственного расположения речевого сигнала и помехи; в меньшей степени на показатели разборчивости в шуме влиял тип направленности микрофона.

При использовании всенаправленного микрофона в транспортном шуме не наблюдалось значимого ухудшения разборчивости речи по сравнению с исследованиями в тишине, т. к. в этих условиях успешно работает опция шумоподавления, наиболее эффективная при пространственном разделении целевого сигнала и помехи, что было продемонстрировано и в других исследованиях [5, 9]. Максимальная разборчивость при активации всенаправленного микрофона как в транспортном шуме, так и в условиях многоголосия отмечалась в ситуации 3 (речь сбоку со стороны СА, шум спереди).

Активация адаптивной направленности микрофона в условиях и транспортного шума, и многоголосия также продемонстрировала наибольшую эффективность в акустической ситуации 3, хотя ранее было показано отрицательное влияние активации адаптивного микрофона в транспортном шуме при подаче речевого сигнала сбоку [10]. Хорошая разборчивость речи, достигнутая в этих условиях, обеспечивалась достаточно высоким отношением сигнал/шум (+6 дБ), а также наличием опции шумоподавления, большую эффективность которой отмечали и другие авторы [11, 12].

При активации микрофона с фиксированной направленностью разборчивость речи на фоне транспортного шума достоверно не изменялась в разных акустических ситуациях, а в условиях многоголосия, как и предполагалось, была наибольшей при подаче речевого сигнала фронтально, а шума сбоку (ситуация 2).

Влияние акустической ситуации на разборчивость речи в шуме у пользователей СА, отмеченное в нашем исследовании и ранее показанное другими авторами (восприятие речевого сигнала улучшается, когда источник речи и маскирующая помеха разделены в пространстве), может быть объяснено улучшением отношения сигнал/шум и физиологическим эффектом пространственного освобождения от маскировки [3, 13]. Отсутствие улучшения разборчивости речи на фоне многоголосия

при разделении целевого сигнала и помехи при активации фиксированного микрофона, как и худшую разборчивость речи в многоголосии по сравнению с транспортным шумом, можно объяснить сходством спектрально-временных характеристик речевого сигнала и помехи, которые воспринимались как два перцептивно идентичных звуковых потока [14].

Высокая степень корреляции разборчивости речи в свободном звуковом поле с результатами тональной пороговой аудиометрии, установленная в нашем исследовании, а также продемонстрированная другими авторами [15, 16], свидетельствует о большом значении периферического звена слухового анализатора для восприятия речи. СА компенсируют периферический слуховой дефицит, корректируя акустические характеристики речевого сигнала в соответствии с аудиограммой пациента. Однако даже высокотехнологичные СА не способны точно воссоздать речевой паттерн из-за искажений, обусловленных их техническими особенностями [17]. Восприятие речи – это не только анализ акустических характеристик слова. Механизм распознавания речи, особенно в присутствии помехи, чрезвычайно сложен и зависит от лингвистического контекста, когнитивного опыта, словарного запаса, рабочей памяти, слухового внимания, требующих активации нейрофизиологических механизмов на всех уровнях слуховой системы [18, 19].

В большей степени хорошая разборчивость, особенно в шуме, определяется не технологическими особенностями СА, а нейрофизиологическими характеристиками слуховой системы конкретного пациента. Даже для молодых лиц с нормальным слухом восприятие речи в условиях помехи является сложной аудиокогнитивной задачей [14]. С возрастом способность понимать речь ухудшается. Уже после 50 лет отмечается снижение разборчивости речи, особенно в речевом шуме [9, 20]. Также с возрастом происходят изменения в балансе между возбуждающими и тормозящими механизмами, что снижает возможность отвлечения внимания от нецелевого сигнала [21]. Нарушения слуха еще больше усложняют процесс распознавания и расшифровки речевого сигнала. Большинство наших пациентов (75%) были люди старше 50 лет, коммуникативные способности которых нарушены не только из-за снижения слуха, но и вследствие общего старения организма, приводящего к нейрокогнитивному дефициту. Предполагается, что начальный процесс идентификации речи обусловлен сенсорными процессами, а конечный – процессами, происходящими в высших отделах слуховой системы [22]. Существующая при центральной обработке речевого сигнала межполушарная асимметрия с доминированием левого полушария имеет индивидуальные различия, влияющие на способность различения речи в шуме [23]. В настоящее время многие исследователи признают участие обоих полушарий мозга при идентификации звуковых сигналов в сложных акустических ситуациях и отмечают повышение значения правого полушария, что может отражать привлечение дополнительных ресурсов мозга для облегчения распознавания речи [24, 25]. Асимметричное снижение слуха увеличивает кортикальную реорганизацию слуховой коры, что приводит к ухудшению межполушарной обработки звукового сигнала, являющейся нейрофизиологической основой распознавания речи в шуме [26]. В нашем исследовании рассматривались только случаи моноаурального слухопро테зирования, которое приводит к увеличению акустической бинауральной асимметрии и вследствие этого к реформированию межполушарного взаимодействия

слуховой коры. Расширение показаний к бинауральному слухопротезированию, а также поиск новых технологических решений для улучшения разборчивости речи в шуме, включая создание более эффективных алгоритмов направленности микрофонов, позволят добиться комфортного восприятия речи на фоне помехи при использовании СА [27].

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разборчивость речи в шуме в условиях монураального слухопротезирования зависит от акустической ситуации (амплитудно-частотных характеристик фонового шума, а также пространственного расположения помехи и полезного сигнала), состояния слуховой функции пациента и в меньшей степени от типа направленности микрофонов.

Зависимость разборчивости речи в СА от состояния слуха на непротезированном ухе указывает на его участие в сложном нейрокогнитивном процессе идентификации речи и подтверждает преимущество бинауральной обработки речевого сигнала для улучшения его разборчивости, особенно в сложных акустических ситуациях, доказывая предпочтительность бинаурального слухопротезирования.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Wu Y-H., Stangl E., Cipara O. et al. Efficacy and effectiveness of advanced hearing aid directional and noise reduction technologies for older adults with mild to moderate hearing loss. *Ear and Hearing*. 2019;40(4):805–822. doi: 10.1097/AUD.0000000000000672
2. Davidson A., Marrone N., Souza P. Hearing aid technology settings and speech-in-noise difficulties. *American journal of audiology*. 2022;31(1):21–31. doi: 10.1044/2021_AJA-21-00176
3. Wolf J., Duke M., Miller S. et al. Evaluation of potential benefits and limitations of noise-management technologies for children with hearing aids. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2022;33(2):66–74. doi: 10.1055/s-0041-1735802
4. Jorgensen E., Xu J., Chipara O. et al. Auditory environments and hearing aid feature activation among younger and older listeners in an urban and rural area. *Ear and Hearing*. 2023;44(3):603–618. doi: 10.1097/AUD.0000000000001308
5. Jespersen C., Kirkwood B., Groth J. Increasing the effectiveness of hearing aid directional microphones. *Seminars in Hearing*. 2021;42(3):224–236. doi: 10.1055/s-0041-1735131
6. Slugocki C., Kuk F., Korhonen P. Effects of directional microphone and noise reduction on subcortical and cortical auditory-evoked potentials in older listeners with hearing loss. *Ear and Hearing*. 2020;41(5):1282–1293. doi: 10.1097/AUD.0000000000000847
7. Boboshko M.Yu., Savenko I.V., Garbaruk E.S. et al. *Practical audiology*. Saint-Petersburg: Dialogue; 2021. 419 p. (in Russian)
8. Boboshko M.Yu., Riekhakaynen E.I. *Speech audiometry in clinical practice*. Saint-Petersburg: Dialogue; 2019. 80 p. (in Russian)
9. Decambon M., Leclercq F., Vincent C. Speech audiometry in noise: SNR loss per age-group in normal hearing subjects. *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*. 2022;139(2):61–64. doi: 10.1016/j.anorl.2021.05.001
10. Wu Y-H., Stangl E., Bentler R., Stanziola R. The effect of hearing aid technologies on listening in an automobile. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2013;24(6):474–485. doi: 10.3766/jaaa.24.6.4
11. Steffens T., Marcrum S. Basic knowledge on the efficacy of hearing aids depending on the type of hearing impairment for ear, nose and throat specialists. *HNO*. 2018;66(2):122–127. doi: 10.1007/s00106-017-0457-2
12. Kuk F., Slugocki C., Korhonen P. An integrative evaluation of the efficacy of a directional microphone and noise-reduction algorithm under realistic signal-to-noise ratios. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2020;31;4:262–270. doi: 10.3766/jaaa.19009
13. Dwyer R., Roberts J., Gifford R. Effect of microphone configuration and sound source location on speech recognition for adult cochlear implant users with current-generation sound processor. *Journal of the American Academy of Audiology*. 2020;31(8):578–589. doi: 10.1055/s-0040-1709449
14. Wasiuk P., Buss E., Oleson J., Calandruccio L. Predicting speech-in-speech recognition: Short-term audibility, talker sex, and listener factors. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2022;152(5):3010–3024. doi:10.1121/10.0015228
15. Lee H., Lee J., Na G. et al. Which patients with a unilateral hearing aid for symmetric sensorineural hearing loss have auditory deprivation? *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*. 2020;13(1):23–28. doi: 10.21053/ceo.2019.00402
16. Dourado R., Caldas F., Cardoso C. et al. Benefits of bimodal stimulation to speech perception in noise and silence. *International Archives of Otorhinolaryngology*. 2023;27(4):645–653. doi: 10.1055/s-0043-1761169
17. Cubick J., Buchholz J.M., Best V. et al. Listening through hearing aids affects spatial perception and speech intelligibility in normal-hearing listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2018;144(5):2896–2905. doi: 10.1121/1.5078582
18. Kell A., McDerm J. Robustness to real-primary and non-primary human auditory cortex. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017;141(5):3896. doi: 10.1121/1.4988749
19. Kocabay A., Aslan F., Yuce D., Turkylmaz D. Speech in noise: implication of age, hearing loss, and cognition. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*. 2022;74(5):345–351. doi: 10.1159/000525580
20. Rahne T., Wagner T., Kopsch A. et al. Influence of age on speech recognition in noise and hearing effort in listeners with age-related hearing loss. *Journal of Clinical Medicine*. 2023;12(19):6133–6145. doi: 10.3390/jcm12196133

21. Ross B., Dobri S., Schumann A. Speech-in-noise understanding in older age: the role of inhibitory cortical responses. *European Journal of Neuroscience*. 2020;51(3):891–908. doi: 10.1111/ejn.14573
22. Eqlimi E., Bockstael F., Schönwiesner M. et al. Time course of EEG complexity attentional engagement during listening to speech in noise. *European Journal of Neuroscience*. 2023;58(7):4043–4068. doi: 10.1111/ejn.16159
23. Slugocki C., Kuk F., Korhonen P. Left lateralization of the cortical auditory-evoked potential reflects aided processing and speech-in-noise performance of older listeners with a hearing loss. *Ear and Hearing*. 2023;44(2):399–410. doi: 10.1097/AUD.0000000000001293
24. Shestopalova L.B., Petropavlovskaya E.A., Semenova V.V., Nikitina N.I. Oscillatory activity of human brain evoked by auditory motion. *I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*. 2020;70(5):616–634. doi: 10.31857/S0044467720050111 (in Russian)
25. Bidelman G., Howell M. Functional changes in inter- and intra-hemispheric cortical processing degraded speech perception. *Neuroimage*. 2016;124(PtA):581–590. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.09.020
26. Cheung S., Atencio C., Levy E. Anisomorphic cortical reorganization in asymmetric sensorineural hearing loss. *Journal of Neurophysiology*. 2017;118(2):932–948. doi: 10.1152/jn.00119.2017
27. Ahmadi R., Jalilvand H., Mahdavi M.E. et al. The Effects of Hearing Aid Digital Noise Reduction and Directionality on Acceptable Noise Level. *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*. 2018;11(4):267–274. doi: 10.21053/ceo.2018.00052