

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 37, номер 4, 2023

---

---

К конференции (Санкт-Петербург 08.07.2023 г.) 283

---

## Обзоры

Роль слуховой обратной связи в контроле голоса при нормальном и сниженном слухе <i>А. М. Луничкин, К. С. Штин</i>	285
Экспериментальные подходы к изучению локализации источников звука по расстоянию при патологии слуха <i>Е. А. Огородникова, Е. А. Клишова, И. Г. Андреева</i>	301
Слуховое восприятие при кохлеарной имплантации <i>В. И. Пудов, О. В. Зонтова</i>	320
Развитие методических подходов для оценки функционального состояния лабиринта внутреннего уха <i>Л. В. Торопчина</i>	330

---

## Экспериментальные исследования

Особенности распознавания речевых сигналов в условиях голосовой конкуренции в норме и при нарушениях слухоречевой функции <i>А. А. Балякова, О. В. Лабутина, И. С. Медведев, С. П. Пак, Е. А. Огородникова</i>	342
Психоакустическое тестирование для оценки функционального созревания центральных отделов слуховой системы <i>И. В. Савенко, Е. С. Гарбарук, М. Ю. Бобошко</i>	348
Трудности кохлеарной имплантации при пороках развития внутреннего уха <i>Н. Т. Тунян, Е. В. Бычкова</i>	363

---

## К юбилею

Петр Петрович Николаев	369
------------------------	-----

---

---

# Contents

---

---

Vol. 37, No. 4, 2023

---

---

## To the conference

Introductory article 283

---

## Reviews

The role of auditory feedback in voice control with normal and impaired hearing  
*A. M. Lunichkin, K. S. Shtin* 285

Experimental approaches to the study of sound sources localization by distance  
in hearing pathology  
*E. A. Ogorodnikova, E. A. Klishova, I. G. Andreeva* 301

Hearing perception by cochlear implantation  
*V. I. Pudov, O. V. Zontova* 320

Development of methodological approaches to assess the functional state  
of the inner ear labyrinth  
*L. V. Toropchina* 330

---

## Experimental studies

Features of speech signal recognition in conditions of vocal competition  
with normal hearing and with hearing or speech disorders  
*A. A. Balyakova, O. V. Labutina, I. S. Medvedev, S. P. Pak, E. A. Ogorodnikova* 342

Psychoacoustic testing to assess the functional maturation of the central  
auditory system  
*I. V. Savenko, E. S. Garbaruk, M. Yu. Boboshko* 348

Difficulties of cochlear implantation in malformations of the inner ear  
*N. T. Tunyan, E. V. Bychkova* 363

---

## Tor the anniversary

P. P. Nikolaev is 80 years old 369

---

---

## К КОНФЕРЕНЦИИ (Санкт-Петербург 08.07.2023 г.)

DOI: 10.31857/S0235009223040108, EDN: HLFNYE

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К РЕАБИЛИТАЦИИ ФУНКЦИЙ СЛУХА

Тематический номер журнала “Сенсорные системы” был создан на основе материалов, представленных на XVI ежегодной научно-практической конференции с международным участием “Нарушения слуха и современные технологии реабилитации”, которая состоялась в г. Санкт-Петербурге 8–9 июня 2023 г. Организаторами конференции выступили Комитет по здравоохранению Санкт-Петербурга, Санкт-Петербургское отделение Российского общества аудиологов, Национальная медицинская ассоциация сурдологов, ФГБОУ ВО “Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова”, ФГБУН “Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова” РАН, СПб ГБУ “Городской гериатрический центр”, Городской сурдологический центр. В работе конференции приняли участие 193 человека: практикующие врачи оториноларингологи, врачи сурдологи-оториноларингологи и слухопротезисты, специалисты в области диагностики нарушений слуха амбулаторно-поликлинических учреждений и стационаров взрослой и детской сети, врачи медико-социальной экспертизы, учителя-дефектологи, научные сотрудники лабораторий, занимающихся исследованиями в области слуха, производители диагностического и реабилитационного оборудования. В ходе работы конференции было заслушано восемь лекций и 25 научных докладов, часть материалов из которых подробно изложена в статьях, представленных в настоящем номере журнала.

Статьи посвящены актуальным направлениям исследований в области физиологии и патологии слуха и речи, а также развития методических подходов к диагностике, лечению и коррекции нарушений в функционировании слухового анализатора человека. Три статьи представляют обзоры по важным вопросам речевого и пространственного слуха: восприятия речи при кохлеарной имплантации (авторы – В.И. Пудов и О.В. Зонтова), роли слуховой обратной связи в контроле голоса при нормальном и сниженном слухе, а также при ломбардной речи (авторы – А.М. Луничкин и К.С. Штин), применения экспериментальных

подходов в исследованиях локализации источников звука по расстоянию при патологии слуха и в клинической практике (авторы – Е.А. Огородникова, Е.А. Клишова, И.Г. Андреева). Еще одна обзорная статья посвящена клиническим методам оценки функционального состояния лабиринта внутреннего уха и классификации его патологий на основе результатов компьютерной томографии височных костей и выявления костно-воздушного интервала при проведении тональной пороговой аудиометрии (автор – Л.В. Торопчина). Клинический аспект выделен и в работе авторов Н.Т. Тунян и Е.В. Бычковой, где обсуждается возможное методическое решение в отношении выполнения операции кохлеарной имплантации при проявлении пороков развития внутреннего уха.

Результаты экспериментальных исследований представлены в статьях “Психоакустическое тестирование для оценки функционального созревания центральных отделов слуховой системы” (авторы – И.В. Савенко, Е.С. Гарбарук, М.Ю. Бобошко) и “Особенности распознавания речевых сигналов в условиях голосовой конкуренции в норме и при нарушениях слухоречевой функции” (авторы – А.А. Балякова, О.В. Лабутина, И.С. Медведев, С.П. Пак, Е.А. Огородникова). В первой из них рассматриваются возрастная динамика развития центральных отделов слуховой системы и использование психоакустических тестов для выявления признаков центральных слуховых расстройств у детей. Авторами проведен большой объем измерений по оценке восприятия ритмических последовательностей стимулов; обнаружения паузы в звуковом сигнале, бинаурального взаимодействия, разборчивости речи в тишине и на фоне шумовой помехи, включая применение русского матричного фразового теста в шуме (RUMatrix). Полученные данные важны для практики дифференциальной диагностики при выявлении незрелости центральной слуховой системы, центральных слуховых расстройств и других слухоречевых нарушений у детей различных возрастных групп. Кроме того, результаты работы свидетельствуют о том, что к подростковому возрасту процесс морфофункционального развития центрального отдела слуховой системы еще не завершен.

Во втором исследовании проведена сравнительная оценка восприятия речевых сигналов в условиях голосовой конкуренции у испытуемых разного возраста с нормой слухоречевой функции и с нарушениями слуха и речи. Авторы имитировали ситуацию “речевого коктейля” при одновременном произнесении изолированных слов диктором-мужчиной и диктором-женщиной. В экспериментах участвовали четыре группы испытуемых разного возраста и слухоречевого статуса (взрослые с нормой слуха и речи, а также с нарушениями слуха; школьники без нарушений слухоречевой функции и с речевыми проблемами). Авторы отметили ухудшение способности к выделению целевых речевых потоков при слухо-

речевых дисфункциях, проявления различий в восприятии мужского и женского голоса в группах испытуемых, а также положительное воздействие направленного перцептивного тренинга. Результаты исследования могут быть применены в практике реабилитации с использованием современных технологий слухопротезирования.

Редакция журнала “Сенсорные системы” выражает надежду, что представленный тематический сборник статей будет интересен широкому кругу специалистов и благодарит председателя Оргкомитета конференции доктора медицинских наук Ларису Евгеньевну Голованову за помощь в организации специального номера журнала.

## РОЛЬ СЛУХОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В КОНТРОЛЕ ГОЛОСА ПРИ НОРМАЛЬНОМ И СНИЖЕННОМ СЛУХЕ

© 2023 г. А. М. Луничкин<sup>1,\*</sup>, К. С. Штин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук  
194223 Санкт-Петербург, пр. Тореза, 44, Россия

\*E-mail: BolverkDC@mail.ru

Поступила в редакцию 04.09.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 25.09.2023 г.

Контроль голоса и речи осуществляется совместной работой прямой и обратной связей. Прямая связь отвечает за активацию выученной артикуляторной программы, в то время как обратная связь предоставляет акустическую и сенсомоторную информацию о выполнении высказывания. Их совместная работа по контролю речи описывается моделью DIVA, в основе которой лежит осуществляемая нервными центрами регуляция слуховой информации и проприорецептивных сигналов относительно артикуляторных программ. Несоответствие сенсорной информации, поступающей по обратной связи с представлением акустического сигнала в слуховой коре, вызывает корректирующие команды. У овладевающих речью детей слуховая обратная связь необходима для правильного освоения артикуляционных навыков, т.е. для формирования прямой связи. По этой причине прелингвально оглохшие взрослые характеризуются значительными нарушениями артикуляции ввиду несформированности артикуляторных навыков. При постлингвальной глухоте сформированная ранее прямая связь сохраняется, что позволяет успешно произносить фонемы. Однако у людей с сенсоневральной тугоухостью ухудшается контроль фонации и артикуляции по механизму слуховой обратной связи, что выражается в увеличении громкости голоса, изменении спектральных характеристик речи и нестабильности голоса по частоте и амплитуде. Похожие речевые изменения обнаруживаются у здоровых дикторов в присутствии шума, маскирующего собственный голос говорящего (эффект Ломбарда). Речь в шуме характеризуется ростом интенсивности голоса, смещением спектральных характеристик в высокочастотную область и гиперартикуляцией. Такая речевая реорганизация представляет собой адаптацию голоса диктора к фоновому шуму, целью которой являются демаскировка голоса и восстановление слуховой обратной связи.

*Ключевые слова:* слухоречевое взаимодействие, слуховая обратная связь, речь, голос, эффект Ломбарда, хроническая сенсоневральная тугоухость, модель DIVA

DOI: 10.31857/S0235009223040042, EDN: HLWQBD

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие и поддержание качества голоса и речи предполагает активное участие нормально функционирующего слуха. Начальным этапом процесса говорения является получение звукового сигнала, которое слух обеспечивает. Разработка ответа, словообразование и произношение слов и фраз представляют собой последующие самостоятельные этапы коммуникации (Guenther, Vladusich, 2012). Слуховая система осуществляет контроль собственного голоса диктора двумя способами — через прямую (feedforward control) и обратную связь (feedback control) (Selleck, Sataloff, 2014). Прямая связь активирует ранее изученные команды для органов артикуляционного аппарата, не используя сигналы слуховой системы в ре-

жиге реального времени. Обратная связь дает информацию о достижении речевой цели в данный момент. Она учитывает поступающий слуховой сигнал и соматосенсорный компонент, который содержит параметры, используемые для речевого воспроизведения: расположение и степень сужения в речевом тракте, проприоцептивные сигналы от мышечных веретен, тактильные паттерны на языке, губах и небе. Эта мультисенсорная информация позволяет корректировать фонацию и артикуляцию (Tourville et al., 2007; Selleck, Sataloff, 2014; Perkell, 2012). Таким образом, произношение звуков и формирование беглой речи формируются и развиваются как с помощью прямой связи, которая отвечает за моторный компонент звукопроизношения, так и с помощью обратной связи.

## МОДЕЛЬ DIVA – НЕЙРОАНАТОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ РЕЧИ

Попытки описать поэтапный моторный контроль речеобразования с вовлечением слуховой системы неоднократно производились с 1980-х гг. (Liberman, Mattingly, 1985; Schwartz et al., 1997), однако, каждая из теорий и моделей охватывала лишь несколько компонентов слухоречевой системы (Mermelstein, 1973; Perrier et al., 1996; Perkell, 2013). В 1992 г. Ф. Гюнтер разработал и описал нейроанатомическую модель контроля речи, получившую название DIVA. В ней рассматривается осуществляемая нервными центрами регуляция воспринимаемой по обратной слуховой связи собственной речи диктора относительно сформированной артикуляторной программы. При этом вектора в сенсорном пространстве (*directions*), отражающие рассогласование произносимых диктором фонем с их сенсорными образами на основе опыта, преобразуются в изменения скорости движения органов артикуляции речевого аппарата (*into velocities of the articulators*) (Perkell, 2013; Guenther, 2016). Таким образом, DIVA представляет собой нейровычислительную модель, описывающую связи между звучащими фонемами, активностью слуховой коры при их восприятии, а также согласование между моторными, слуховыми и соматосенсорными образами, которые вызывают эти фонемы, и такими же образами, извлекаемыми из памяти (Guenther, 1995; 2016; Guenther et al., 2006).

Нейрональную активность в слуховой коре головного мозга рассматривают как представление акустического сигнала, которое содержит информацию о частоте основного тона (ЧОТ) и частотах последующих формант. Компоненты моторной активности соответствуют степени сокращения голосовых мышц при фонации и позициям органов артикуляции, ответственных за производство речи, а именно языку, губам, нижней челюсти, гортани и мягкому небу. Соматосенсорная активность представлена параметрами, которые определяются проприоцептивными сигналами от мышечных веретен и тактильной афферентацией, приходящей от языка, губ и неба (Guenther, 2016).

Согласно DIVA, создание фонемы начинается с активации нейронного представления звука в зоне Брока вышестоящим уровнем в головном мозге, что в свою очередь приводит к считыванию слуховых, соматосенсорных и моторных сигналов. Предполагается, что звуковая карта речи состоит из нейронов, расположенных преимущественно в левой вентральной премоторной коре, и активация этого участка приводит к включению в работу систем контроля обратной и прямой связей. Система контроля обратной связи разделяется на два компонента: на подсистему контроля слуховой обратной связи и подсистему контроля соматосенсорной обратной связи, в свою очередь

система контроля прямой связи отвечает за моторный компонент (Bouchard, Chang, 2014; Guenther, 2016).

Несмотря на высокую скорость работы органов артикуляции и высокую скорость речи, существуют задержки во времени произношения слов, свойственные нейронной обработке сенсорных сигналов. Система контроля слуховой обратной связи имеет внутреннюю задержку около 100–150 мс (Bouchard, Chang, 2014; Guenther, 2016), поэтому весь паттерн мышечной работы необходимо сгенерировать до активации слуховой обратной связи. За данную работу отвечает система прямой связи. Система контроля прямой связи отвечает за ранее сформированные моторные речевые программы и состоит из двух компонентов (Guenther, 2016). Первый компонент отвечает за запуск моторной программы в момент говорения и генерируется петлей кортико-базальных ганглиев в дополнительной моторной области, расположенной в лобной доле коры полушарий головного мозга (Villacorta et al., 2007). После активации сигнал проходит через бледный шар и черную субстанцию базальных ганглиев среднего мозга и ядра таламуса, способствуя запуску моторной программы для говорения в данный момент времени. Второй компонент – это собственные моторные программы, позволяющие воспроизводить изученные ранее звуки и фонемы речи (Guenther, 2016; Villacorta et al., 2007). Они обусловлены активностью вентролатеральной префронтальной коры.

Подсистема контроля слуховой обратной связи отвечает за коррекцию требуемого слухового сигнала и текущей слуховой обратной связи, которая возникает в ситуации самопрослушивания диктором своего голоса. Согласно модели DIVA, аксоны из области Брока прямо или опосредованно через кортико-мозжечковую петлю доходят до области слуховой коры в височной доле, включающую *planum temporale* и верхнюю височную извилину (Keough, 2013; Guenther, 2016). Подсистема контроля соматосенсорной обратной связи работает совместно с вышеописанной подсистемой контроля слуховой обратной связи и ее основные компоненты расположены в вентральной соматосенсорной коре, включая вентральную постцентральную извилину и надкраевую извилину в теменной доле головного мозга. Соматосенсорные рецепторы представляют собой механорецепторы в области гортани, которые вместе с работой мышечных веретен речевого тракта передают в ЦНС информацию о скорости вибраций голосовых складок и интенсивности голоса. Во время воспроизведения звука тактильная и проприоцептивная обратная связь от механорецепторов и мышечных веретен речевого тракта идет через проекции корково-кортикальных и кортико-мозжечковых петель через вен-

тральное заднемедиальное ядро таламуса (Ito, Ostry, 2010; Keough, 2013; Guenther, 2016).

Влияние соматосенсорного контроля на частоту основного тона голоса было показано в экспериментах с применением местного анестетика у людей (Larson et al., 2008). Использование местной анестезии на голосовых связках или верхнем гортанном нерве приводит к снижению контроля над точным ЧОТ голоса и снижению процесса изменения ЧОТ в условиях окружающей маскировки (Svirsky et al., 1992; Larson et al., 2008). Кроме этого, соматосенсорный контроль играет важную роль в начале вокализации, а именно во время “дофонаторной настройки” (prephonatory tuning) певцов перед пением, когда происходит правильное сокращение мышц речевого тракта, регулировка работы хрящей гортани и напряжение голосовых связок для воспроизведения желаемой ноты. В этом случае своевременное включение соматосенсорной обратной связи позволяет диктору узнать, находятся ли хрящи и голосовые связки в правильном положении до начала вокализации (Wyke, 1974).

Заметим, что двигательные команды с прямой связью не могут быть полностью врожденными; они должны быть сформированы в периоды младенчества и детства, чтобы позволить генерировать акустически подходящие фонемы и слоги родного языка, используя особую морфологию речевого тракта ребенка (Graven, Brown, 2008; Gervian, Mehler, 2010). Таким образом, прямой и обратный контроль речи тесно связаны.

### РОЛЬ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ФОРМИРОВАНИИ ПРЯМОЙ СВЯЗИ

Контроль прямой связи относится к моторной системе, которая не анализирует входящий звуковой сигнал, а активирует уже сохраненную раннее программу для органов артикуляционного аппарата (Tourville, Guenther, 2011; Guenther, 2016). Двигательные команды прямой связи не могут быть полностью врожденными, они должны быть изучены в младенчестве и детстве на основе опыта восприятия и имитации фонем и слогов родного языка (Guenther, 2016).

В раннем возрасте вклад прямой связи в контроль речи будет небольшим, поскольку моторная команда еще недостаточно развита. Поэтому в течение некоторого времени речевая модель будет контролироваться обратной связью. Моторная команда и связанная с ней система прямой связи со временем укрепляется и совершенствуется. Далее по мере развития речевых артикуляторных навыков происходит полное включение в работу моторных команд, что позволяет системе прямой связи оставаться активной в течение всей жизни. Особенно это важно для пациентов с постлингвальной тугоухостью или глухотой

(Zamani et al., 2021), а также для фонации при высоком уровне шума (Lane, Tranel, 1971; Pittman, Wiley, 2001). Такой тип контроля используется вокалистами, которые выступают с оркестром, в условиях использования многоголосия и при хоровом пении (Tourville, Guenther, 2011; Selleck, Sataloff, 2014).

Для речи детей младшего возраста, по сравнению со взрослыми, характерна более высокая интенсивность голоса (Siegel et al., 1976; Amazi, Garber, 1982). Значения частоты основного тона и формант лежат в более высокочастотной области, а наклон спектра (наклон линейной регрессии логарифмического спектра мощности в заданном диапазоне частот) описывается большей крутизной (Lee et al., 1999). Поскольку в контроле речепродукции у детей высокую роль играет самоприслушивание (Amazi, Garber, 1982), повышенные значения интенсивности голоса и его спектральных характеристик служат для облегчения различения собственной речи. Известно, что дети 3–4 лет лучше справляются с задачей повторения речевого стимула, чем с задачей названия объекта (Vance et al., 2005). При этом, если в возрасте трех лет точность повторения слов и несловесных стимулов не различаются, то уже в четырехлетнем возрасте повторение слов становится более точным, по сравнению со звуками. Артикуляционные программы, позволяющие правильно произносить речевые элементы, окончательно формируются уже к 5–7 годам. Помимо изменений, описанных в вышеупомянутой работе, для речи детей обнаруживаются большая длительность сегментных элементов и повышенная вариабельность временных и спектральных характеристик (Smith et al., 1983; 1996; Lee et al., 1999). С возрастом величина всех этих показателей снижается и к 12 годам приобретает черты, характерные для взрослой речи (Smith et al., 1996; Lee et al., 1999). Эти изменения связывают с развитием нейромышечного контроля и приобретением опыта речепродукции (Smith et al., 1996; Vance et al., 2005). Однако развитие речепродукции может испытывать значительное влияние индивидуальных особенностей ребенка (Smith et al., 1983; 1996), в частности его пола (Lee et al., 1999).

### НАРУШЕНИЕ КОНТРОЛЯ РЕЧИ ПРИ ПАТОЛОГИИ СЛУХА

У глухих пациентов работа прямой связи, а следовательно, качество освоения артикуляторных жестов, необходимых для произнесения фонем, может отличаться в зависимости от времени потери слуха.

У прелингвально оглохших взрослых пациентов, потерявших слух в период до овладения речью, отсутствует слуховой опыт и недоразвит нейромышечный отдел речевой системы, отвеча-

ющий за правильное произношение фонем и артикуляцию (Ubrig et al., 2019). Вследствие того, что системы прямой и обратной связи не сформированы, у таких людей наблюдаются серьезные нарушения как фонации, так и артикуляции. К нарушению фонации у прелингвальных пациентов относят повышение ЧОТ (Coelho et al., 2019; 2015), узкий диапазон этой характеристики, а также то, что дикторы начинают и заканчивают произношение фразы с повышенными значениями ЧОТ (Stathopoulos et al., 1986). У пациентов описывают охриплость голоса, одышку при вокализации, чрезмерное напряжение голоса, изменение скорости речи, а также нестабильность голоса (Coelho et al., 2015). Ряд авторов отмечают, что речь дикторов с прелингвальной глухотой отличается монотонностью и сохранением эмоциональной окраски голоса в пределах фразы на одном уровне (Campisi et al., 2006, Voelker, 1935). В ранних исследованиях качества речи приводились примеры замедленной речи прелингвально оглохших дикторов, включавших наличие дополнительных пауз во время говорения и увеличение продолжительности вокальных сегментов (Stathopoulos et al., 1986). Анализ пауз в речи показал, что у глухих пациентов имеются как длинные паузы между предложениями, так и короткие паузы внутри произносимого предложения (Stathopoulos et al., 1986).

Из-за несформированного прямого контроля у прелингвально оглохших пациентов наблюдается нарушение освоения артикуляторных жестов, в частности вертикальных и горизонтальных движений языка. Это приводит к заметному изменению значений первой и второй формант гласных звуков (F1 и F2), которые отражают конфигурацию гортани и ротовой полости и позволяют различать гласные звуки между собой. Для наглядного изображения качества выполнения артикуляционных программ используется метод построения формантного треугольника с вершинами гласных [а], [у], [и] (Андреева, Куликов, 2004). При этом у прелингвально оглохших пациентов на формантной плоскости F1–F2 наблюдается выраженная централизация гласных. Под термином “централизация гласного звука” понимается процесс, когда органы речеобразования не успевают за определенный промежуток времени, отведенного для артикуляции, достичь эталонного для произношения соответствующего гласного звука положения (Schenk et al., 2003). У дикторов с прелингвальной глухотой наблюдаются снижение показателя F1 для гласного звука [а] и повышение его для [у] и [и], что связано с более высокой вертикальной позицией языка при говорении. Несколько другие значения можно наблюдать для показателя F2 – повышение его для гласных звуков [у] и [а] и снижение для гласного звука [и],

что связано с ограничением горизонтальных движений языка.

У постлингвально оглохших пациентов сохраняется сформированный ранее контроль прямой связи (Штин и др., 2023), и отличия в процессе речепродукции относятся к утрате контроля обратной слуховой связи. Это выражается в повышении ЧОТ, увеличении громкости речи (Lee, 2012; Lee et al., 2019), нестабильности голоса по частоте (jitter) и амплитуде (shimmer) (Coelho et al., 2015). Изменения данных параметров соотносят с трудностями контроля подглоточного давления и напряжения голосовых связок, что вызывает нарушения при фонации (Das et al., 2013; Selleck, Sataloff, 2014). Для речи таких пациентов характерны “аудиогенная дисфония” и “аудиогенная дислалия”, которые возникают в результате нарушения координированной работы мышц гортани и речевых мышц. Выявлено, что у постлингвально оглохших пациентов снижается жизненная емкость легких, уменьшается время максимальной устойчивой фонации, повышается сопротивление гортани, что приводит к дальнейшей перегрузке и чрезмерной подвижности голосовых складок (Higgins et al., 1994; Sziękowska, Myszel, 2021).

При отсутствии длительной слуховой стимуляции участков головного мозга, отвечающих за речепродукцию, у дикторов с постлингвальной потерей слуха утрачивается не только контроль обратной, но и прямой связи. Протезирование слуховыми аппаратами и использование кохлеарных имплантов помогают поддерживать фонацию и артикуляцию на должном уровне. У дикторов с прелингвальной потерей слуха при использовании кохлеарных имплантов отмечаются снижение ЧОТ, снижение нестабильности голоса по частоте и амплитуде, а также уменьшение соотношения в голосе шумовых и гармонических компонентов (noise-to-harmonic ratio) (Nosevar-Boltezar et al., 2005). При исследовании характеристик голоса у постлингвально оглохших дикторов проводилось исследование речевых навыков после 5-часового отключения кохлеарного импланта (Zamani et al., 2021). В результате у дикторов с выключенным речевым процессором не обнаруживали изменений в артикуляции, и, более того, параметры были сходны с дикторами с нормой слуха. Данный феномен можно объяснить тем, что артикуляция у постлингвально оглохших дикторов после кохлеарной имплантации остается сохранной, благодаря сформированной слуховой и соматосенсорной системам обратного контроля (Gautam et al., 2019). Среди детей наиболее успешные результаты после кохлеарной имплантации демонстрируют прелингвально оглохшие дети, прооперированные в возрасте до 4 лет, когда идет активный процесс формирования речевых навыков. Другую катего-

рию с успешными речевыми навыками составляют внезапно оглохшие взрослые дикторы, прооперированные в течение 1 года, у которых сохраняются процессы прямого слухового контроля.

### НАРУШЕНИЕ КОНТРОЛЯ РЕЧИ У ЗДОРОВЫХ ДИКТОРОВ В УСЛОВИЯХ ШУМА

Первые доказательства влияния обратной связи на речь были получены в исследованиях, показавших непроизвольные изменения голоса диктора в шумной обстановке. Данный феномен впервые был описан в 1911 г. Этьеном Ломбардом, который ввел понятие о том, что звуковая среда влияет на текущую речь диктора. Впоследствии феномен был назван эффектом Ломбарда (Zollinger, Brumm, 2011; Hotchkin, Parks, 2013; Garnier, Henrich, 2014; Luo et al., 2018). Присутствие шума маскирует голос диктора, нарушая слуховую обратную связь. Задача демаскировки собственного голоса в шуме решается диктором, благодаря повышению голосового усилия, и смешением спектральных характеристик речи. Такая измененная речь носит название ломбардной.

Наиболее характерные и хорошо изученные проявления эффекта Ломбарда связаны с непроизвольным изменением фонации. Говорение в шуме сопровождается увеличением громкости голоса (Lane, Tranel, 1971; Amazi, Garber, 1982; Summers et al., 1988; Letowski et al., 1993; Pittman, Wiley, 2001; Bottalico et al., 2017; 2022). Усиление голоса сопровождается изменением работы голосовых мышц, которое ведет к большему натяжению голосовых связок и росту значений ЧОТ (Garnier, Henrich, 2014; Van Ngo et al., 2017; Kleczkowski et al., 2017; Alghamdi et al., 2018; Shen et al., 2023; Lunichkin et al., 2023).

Спектральные изменения, связанные с артикуляцией, выражаются в смещении значений формант гласных звуков. Первая форманта при говорении в шуме всегда увеличивается, а изменения второй форманты разнонаправлены для разных гласных (Summers et al., 1988; Bond et al., 1989; Garnier et al., 2006a; Garnier, Henrich, 2014; Tang et al., 2017; Alghamdi et al., 2018; Matsumoto, Akagi, 2019; Lunichkin et al., 2023). Изменение формантной структуры в ломбардной речи приводит к изменению площади пространства гласных на плоскости F1-F2: она увеличивается в английском (Cooke, Lu, 2010), японском (Van Ngo et al., 2017) и мандаринском китайском (Tang et al., 2017), но уменьшается в русском (Lunichkin et al., 2023).

Смещение в высокочастотную область спектральных характеристик голоса — ЧОТ, F1 и, для некоторых гласных звуков, F2 — ведет к росту значений центра спектра (Junqua, 1993; Lu, Cooke, 2008; 2009a; Garnier, Henrich, 2014) и упло-

щению наклона спектра (Junqua, 1993; Lu, Cooke, 2009b; Cooke, Lu, 2010; Jokinen et al., 2016; Van Ngo et al., 2017; Kleczkowski et al., 2017).

В присутствии шума становятся более выраженными движения трех органов артикуляции: нижней челюсти, губ и языка (Garnier et al., 2006b; 2018; Simko et al., 2016; Alghamdi et al., 2018). Наиболее сильно в шуме увеличиваются движения нижней челюсти, а также смыкание и размыкание губ (Kim et al., 2005; Garnier et al., 2006b; Garnier, 2008; Simko et al., 2016). По сравнению с тишиной губы сильнее выпячиваются и растягиваются (Kim et al., 2005; Garnier et al., 2006b; Garnier, 2008). Наблюдается гиперартикуляция языка, хотя по сравнению с движением челюсти и губ она выражена слабее (Simko et al., 2016). В ряде работ показано, что ускоряется движение нижней челюсти (Garnier et al., 2006b; Garnier, 2008) и нижней губы (Huber, Chandrasekaran, 2006). По другим наблюдениям общая скорость артикуляции, наоборот, снижается (Shen et al., 2023).

Усиление артикуляции языка в меньшей степени, чем движений нижней челюсти и губ, может быть связано с тем, что движения языка ограничены ротовой полостью. Поэтому гиперартикуляция языка тесно связана с величиной опускания челюсти и соответствующего открытия рта. Однако язык играет важную роль в формировании сегментных элементов речи, и его излишняя гиперартикуляция может привести к снижению разборчивости высказывания (Simko et al., 2016). В свою очередь движения челюсти и губ, помимо их сегментного значения, участвуют в надсегментной, просодической стороне речепродукции, — регуляции интенсивности, частоты тона и длительности звуков речи. Было обнаружено усиление корреляции артикуляции челюсти с голосовым усилием (Kim et al., 2005). С практической точки зрения это означает, что широкое открытие челюсти и губ позволяет издавать более громкий речевой сигнал (Simko et al., 2016). Таким образом, изменение артикуляции в условиях шума реализует как сегментные задачи (увеличение членораздельности речи), так и просодические (усиление голоса и повышение ЧОТ).

В присутствии шума изменяются временные характеристики речи. Гласные звуки становятся более длительными, в то время как согласные укорачиваются (Junqua, 1993; Garnier et al., 2010; Garnier, Henrich, 2014; Kleczkowski et al., 2017; Van Ngo et al., 2017). Паузы между словами увеличиваются (Cooke, Lu, 2010; Kleczkowski et al., 2017). Влияние шума на скорость речи неоднозначно и, по всей видимости, зависит от речевого материала и контекста, в котором происходит ее произношение. Так, в работах, где диктор читал текст, обнаруживаются снижение скорости речи и увеличение длительности слов (Bond et al., 1989; Summers et al., 1988; Garnier et al., 2006a). Вместе с

тем при коммуникации произносимые в шуме слова и фразы укорачиваются (Kleczkowski et al., 2017; Hadley et al., 2019). В работе (Junqua, 1993) было обнаружено, что для английской ломбардной речи характерна потеря фонем [T], [P], [F], расположенных на конце слова.

Таким образом, в большом количестве исследований было продемонстрировано, что адаптация голоса диктора к фоновому шуму, которая заключается не только в его усилении, как считалось изначально, но в глобальной речевой реорганизации спектральных и временных характеристик. Вместе с тем величина ломбардной речи может модифицироваться большим числом факторов, среди которых основных три: тип и уровень шума; задача, стоящая перед диктором; язык, пол и возраст диктора (Zollinger, Brumm, 2011; Hotchkin., Parks, 2013).

### ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОМБАРДНОЙ РЕЧИ

Характерное для ломбардной речи усиление голоса впервые обнаруживается в шуме интенсивностью 43 дБ (Bottalico et al., 2017). С дальнейшим ростом интенсивности шумового маскира наблюдается соответствующее изменение значений спектральных, амплитудных и временных характеристик голоса (Summers et al., 1988; Stowe, Golob, 2013; Van Ngo et al., 2017; Hadley et al., 2019; Bottalico et al., 2022).

Тип шума, определяемый его спектральными характеристиками, так же оказывает влияние на выраженность эффекта Ломбарда. Было показано, что эффект Ломбарда чувствителен к частотам, важным для повседневной речи, и не является ответом на любой шум в среде (Stowe, Golob, 2013). В данной работе изучали изменения речи в широкополосном шуме (0.2–20 кГц), частотные характеристики которого соответствуют речевой области (0.05–4 кГц), и шум, в котором эта частотная область вырезана (4–20 кГц). Наибольшие изменения обнаруживались в широкополосном шуме, в то время как шум с вырезанными речевыми частотами не оказывал влияния на голос диктора. Вместе с тем в этом исследовании перед диктором стояла задача чтения текста, которая не учитывала коммуникационный компонент.

В работе (Kleczkowski et al., 2017) наибольшие изменения речи наблюдали в шуме многоголосия или толпы. В то же время авторы работы (Garnier et al., 2006a) показали, что увеличение интенсивности голоса и длительности слов выше в белом шуме, тогда как средние значения ЧОТ выше в шуме многоголосия. В работе (Cooke, Lu, 2010) были рассмотрены несколько типов маскира, в том числе “конкурирующая речь” и шум, в котором уровень частот подобно речи человека снижался от низких к высоким (speech-shaped noise).

Наибольший рост значений интенсивности голоса и ЧОТ, а также наибольшее уплощение наклона спектра наблюдались во втором случае. Это, по всей видимости, объясняется тем, что такой шум обеспечивал более сильную энергетическую маскировку голоса диктора. Изучение ломбардных изменений в шуме многоголосия, различавшегося числом говорящих, показало, что значения интенсивности ЧОТ, спектрального центроида, и длительность фразы выше в шуме с большим числом одновременно говорящих (Lu, Cooke, 2008). Также в шуме многоголосия движения нижней челюсти и рта были более выражены, чем в белом шуме (Garnier et al., 2006b; Kim et al., 2005).

В качестве речевой задачи ранние исследования, посвященные эффекту Ломбарда, использовали чтение текста или монологическую речь. Работа авторов (Amazi, Garber, 1982) является одной из первых, где особенность ломбардной речи изучали с точки зрения различных речевых задач, – чтения и рассказа истории слушателю. Авторы показали, что наличие коммуникации увеличивало степень ломбардных изменений. Схожие результаты были получены в исследовании (Junqua et al., 1999). Гарнье с соавторами обнаружили, что в том случае, когда дикторы вовлечены в задачу интерактивного общения, значения роста интенсивности голоса, ЧОТ, первой форманты и центроида спектра выше, чем при неинтерактивном чтении (Garnier et al., 2010). Влияние коммуникативной задачи на большое число характеристик речи в шуме было изучено в работе (Cooke, Lu, 2010). Было установлено, что при интерактивном общении значения ЧОТ и интенсивности голоса выше, а наклон спектра более уплощен. Кроме того, по сравнению с чтением текста, коммуникативная задача приводит к повышению скорости речи, длительности пауз и снижению длительности слов (Cooke, Lu, 2010).

Помимо когнитивной задачи, ломбардные изменения, по всей видимости, могут зависеть от структуры фонем устной речи и особенностей ее произношения (Garnier et al., 2006; Zhao, Jurafsky, 2009; Vainio et al., 2012), а также лингвистической роли слов во фразе (Patel, Shell, 2008). Есть свидетельства, что в некоторых случаях имеет значение то обстоятельство, что говорящий является носителем конкретного языка. Так, у дикторов, для которых английский язык не является родным, ЧОТ при произношении английских слов увеличивается сильнее, чем у его носителей. Вместе с тем для голландского языка такой закономерности не было обнаружено (Marcoux, Ernestus, 2019).

Усиление громкости голоса в шуме обнаруживается уже у детей в возрасте 3–5 лет (Siegel et al., 1976; Amazi, Garber, 1982). При этом, в отличие от взрослых, у детей дошкольного возраста величина ломбардных изменений не зависит от поставленной речевой задачи (Amazi, Garber, 1982). Ав-

торы связывают данный факт с тем, что речевая функция у детей изученного возраста еще не сформирована полностью и самопрослушивание играет определяющую роль в ее контроле, вне зависимости от наличия или отсутствия собеседника. На такую роль обратной слуховой связи у детей указывает то обстоятельство, что уровень их голоса выше, чем у взрослых, как в тишине, так и в условиях шума (Amazi, Garber, 1982), а усиление самопрослушивания ослабляет ломбардные изменения в меньшей степени, чем у взрослых (Siegel et al., 1976). Возрастные изменения эффекта Ломбарда у взрослых дикторов исследованы недостаточно. В большинстве работ изучена ломбардная речь только определенной возрастной группы (Garnier, Henrich, 2014; Kleczkowski et al., 2017; Bottalico, 2017; Bottalico et al., 2018; Shen et al., 2023). В других исследованиях изучены голоса в широком диапазоне возрастов, но их раздельный анализ не был проведен (Amazi, Garber, 1982; Zhao, Jurafsky, 2009; Anand et al., 2021). Вместе с тем, согласно последовательно проведенным исследованиям (Bottalico, 2018; Bottalico et al., 2022), у дикторов младшего зрелого возраста (18–35 лет) увеличение интенсивности голоса в шуме выше, чем у пожилых дикторов (от 60 лет).

В большей части исследований эффекта Ломбарда пол дикторов не учитывали (Lu, Cooke, 2009a, 2010; Stowe, Golob, 2013; Bottalico et al., 2017; Bottalico et al., 2022), несмотря на это ряд из них позволяет проанализировать межполовые особенности адаптации голоса в шуме. В работах (Patel, Schell, 2008; Garnier, Henrich, 2014) не было обнаружено различий мужчин и женщин по степени увеличения ЧОТ и интенсивности голоса. Тогда как в работах (Letowski et al., 1993; Kleczkowski et al., 2017; Alghamdi, et al., 2018) показана большая степень усиления голоса и роста ЧОТ у женщин, по сравнению с мужчинами. Или, наоборот, рост значений ЧОТ по данным (Junqua, 1993; Letowski et al., 1993; Shen et al., 2023) сильнее выражен у мужчин. Последний факт может быть так же объяснен тем, что обычно женский голос изначально выше (Garnier, Henrich, 2014).

Неоднозначность данных о половых особенностях ломбардной речи может объясняться несоответствием в разных исследованиях выбранного типа шума и поставленной перед диктором речевой задачи. В следующих работах рассмотрены разные когнитивные ситуации: смоделирована ситуация коммуникации (Patel, Schell, 2008; Garnier, Henrich, 2014; Kleczkowski et al., 2017); чтение предложенного текста (Junqua, 1993; Letowski et al., 1993; Alghamdi, et al., 2018; Shen et al., 2023). Различались экспериментальные работы и структурой шума. Белый шум использовался в работе (Junqua, 1993), шум многоголосия в (Patel, Schell, 2008; Garnier, Henrich, 2014), шум с уменьшением уровня частот от низких к высоким в

(Alghamdi et al., 2018; Shen et al., 2023). В работах (Letowski et al., 1993; Kleczkowski et al., 2017) применялись различные типы маскира, в том числе шум многоголосия. Описанная ситуация иллюстрирует то, что различие в протоколах исследований, посвященных изучению адаптации голоса к шуму, затрудняет сравнение их результатов. Эффект Ломбарда долгое время изучался и рассматривался исключительно в качестве примера того, как нарушение слуховой обратной связи влияет на контроль речеобразования (Lane, Tranel, 1971; Garnier et al., 2010). Более поздние исследования предоставили доказательства того, что изменения голоса в шуме носят рефлекторный характер и обеспечивают адаптацию речи к фоновому шуму.

Изменения речепродукции в шуме служат для решения двух акустических задач. Первая заключается в усилении самопрослушивания, т.е. реализации слуховой обратной связи, необходимой для контроля голосообразования. Это подтверждается тем обстоятельством, что дополнительная подача диктору его голоса ослабляет эффект Ломбарда, хотя и не отменяет его полностью (Pick et al., 1989; Garnier et al., 2010; Bottalico et al., 2016). Кроме того, эффект Ломбарда оказывается больше по величине, если шум подается в головные телефоны, а не в излучатели в свободном пространстве (Garnier et al., 2010). Это объясняется тем, что первые оказывают на самопрослушивание дополнительное заглушающее действие. Вторая задача связана с коммуникативным взаимодействием между диктором и слушателем (Lane, Tranel, 1971; Junqua, 1993; Garnier et al., 2010; Hazan, Baker, 2011). При интерактивном взаимодействии диктора и слушателя изменения ломбардной речи оказываются более выраженными.

В результате изменений ломбардная речь распознается в шуме лучше, чем обычная (Summers et al., 1988; Pittman, Wiley, 2001; Lu, Cooke, 2008; Van Ngo et al., 2017). В работе (Garnier, Henrich, 2014) был предложен ряд механизмов, которые могут способствовать различению ломбардной речи в шуме: увеличение голосового усилия и соответствующее снижение соотношения шум\речь (boosting strategies); смещение ЧОТ и первой форманты в области локального минимума шумового маскира (bypass strategies); и модуляция характеристик голоса на фоне шума с постоянными спектрально-амплитудными характеристиками. Результаты проведенного исследования показали, что основной стратегией адаптации голоса к шуму является рост его интенсивности, однако, авторы предполагают существование дополнительного уровня адаптации, который обеспечивает более тонкие изменения, оптимизирующие акустический контраст.

Помимо общего усиления голоса, в ряде исследований показано, что распознаванию спо-

собствуют такие характерные для ломбардной речи особенности как рост ЧОТ (Bradlow et al., 1996; Lu, Cooke, 2009b), уплощение наклона спектра (Lu, Cooke, 2009b; Junqua, 1993), максимизация энергии в области 1–3 кГц (Hazan, Markham, 2004), увеличение площади пространства гласных (Bradlow et al., 1996; Van Ngo et al., 2017) и рост длительности слов (Hazan, Markham, 2004; Lu, Cooke, 2009b). Важным аргументом в пользу совместного влияния всех этих изменений на разборчивость речи является совпадение акустических особенностей ломбардной речи и “разборчивой речи” (clear speech) совпадают, причем последняя предназначена для преодоления сложных коммуникативных ситуаций (Lam, Tjaden, 2013; Shen et al., 2023).

### МЕХАНИЗМЫ КОНТРОЛЯ ЛОМБАРДНОЙ РЕЧИ

Как обсуждалось выше, контроль голосообразования реализуется прямой и обратной связями, связанными с произвольным и непроизвольным контролем речи соответственно. В шуме из-за нарушения самопрослушивания возникает несоответствие между прямой связью и слуховой обратной связью, что формирует команды, корректирующие фонацию и артикуляцию (Meekings et al., 2016; Meekings, Scott, 2021). Реализация эффекта Ломбарда обусловлена работой подкорковых отделов системы управления голосовой моторикой: эффект обладает непроизвольным характером (Zollinger, Brumm, 2011; Hotchkyn, Parks, 2013; Luo et al., 2018), его трудно преодолеть осознанно, даже если перед диктором стоит задача поддерживать уровень голоса на одном значении (Mahl, 1972; Pick et al., 1989; Tonkinson, 1994), вовлеченные в разговор люди не замечают изменений своего голоса, если к этому не привлекать их внимание (Mahl, 1972). Ключевая роль подкорковых центров подтверждается еще и тем, что некоторые проявления эффекта присутствуют у видов, не имеющих слуховых центров в коре больших полушарий, например, у рыб и лягушек (Holt, Johnston, 2014; Halfwerk et al., 2016). Данные, полученные на млекопитающих, в том числе приматах, позволяют предположить участие в реализации ломбардной речи верхнеоливарного комплекса и парамедианной ретикулярной формации моста, околосреднего серого вещества среднего мозга (PAG), а также латеральной ретикулярной формации (Nonaka et al., 1997; Hage et al., 2006; Luo et al., 2018).

Вопрос о том, является ли ломбардная речь исключительно непроизвольным ответом на присутствие громкого шума и в какой степени она может отражать произвольные изменения речи, был долгое время дискуссионным (Garnier et al., 2008). По всей видимости, в ряде случаев взаимо-

действие корковых и подкорковых структур акустической нейросети позволяет осуществлять произвольный контроль голосообразования в шумной обстановке. Как упомянуто ранее, при интерактивном общении эффект Ломбарда более выражен. Поскольку диктор осознает затруднения, с которыми сталкивается слушатель при распознавании его голоса, он старается демаскировать свою речь (Amazi, Garber, 1982; Lau, 2008; Garnier et al., 2010; Hadley et al., 2019). В исследовании (Lau, 2008) было обнаружено, что усиление голоса выявляется и в том случае, если в шуме находится только слушатель, но диктор осведомлен об этом. Было продемонстрировано, что дикторы изменяют параметры своего голоса в разных типах шума, согласно нуждам их партнеров по коммуникации (Hazan, Baker, 2011).

В некоторых исследованиях была показана возможность модификации эффекта Ломбарда путем обучения или предоставления говорящему дополнительной сенсорной информации. В работе (Prick et al., 1989) выявлено, что в шуме 90 дБ диктор не способен самостоятельно подавить увеличение громкости голоса, даже если специально обучается этому. Однако у обучавшихся контролю голоса его увеличение оказывалось достоверно меньше, по сравнению с неподготовленными дикторами. Вместе с тем, если диктору предоставлялась визуальная информация об уровне его голоса, то это позволяло ему поддерживать громкость своей речи на требуемом уровне. Более того, когда визуальная обратная связь была удалена, интенсивность голоса диктора не увеличивалась и сохранялась на уровне, достигнутом при использовании визуальной информации. Аналогичные результаты были получены в исследовании (Therrien et al., 2012), где визуализация соответствия уровня голоса заданному эталону не полностью подавляла эффект Ломбарда, но существенно снижала его. У профессиональных хороших певцов наблюдают более слабый эффект Ломбарда, чем у непрофессионалов, что обусловлено тренировкой (Tonkinson, 1994; Bottalico et al., 2016). Таким образом, вовлечение кортикальных процессов способно модулировать эффект Ломбарда как в направлении его активации, так и торможения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешный контроль голоса и речи определяется наличием сформированной во время освоения речевых навыков прямой связи, отвечающей за реализацию артикуляционных программ, и обратной связи, которая зависит от качества слуха. Таким образом, нормальная работа слуховой системы критична для реализации речевой функции человека. Речь людей, потерявших слух в прелингвальный период, характеризуется значи-

тельными нарушениями, так как контроль посредством прямой связи оказывается несформированным. В постлингвальном периоде изменения фонации и артикуляции могут быть связаны с двумя случаями рассогласования работы прямого и обратного контроля. В первом случае нормальной работе обратной слуховой связи препятствует постлингвальная тугоухость или глухота. При этом поддержание фонации и артикуляции возможно, благодаря протезированию слуховыми аппаратами или использованию кохлеарных имплантов. Во втором случае слух сохраняется, однако, обратная связь нарушается присутствием в среде шумового маскера, понижающим степень самопрослушивания диктора. И при тугоухости, и в шуме способность диктора к произнесению фонем сохраняется благодаря наличию сформированной прямой связи, но речь таких дикторов обладает рядом особенностей, связанных с изменением ее спектрально-амплитудных характеристик. В обоих случаях наблюдаются рост интенсивности голоса, смещение его спектральных компонентов в высокочастотную область, что, по всей видимости, имеет целью повысить самопрослушивание диктора и восстановить обратную связь (Junqua, 1993; Lu, Cooke, 2009b; Hazan, Markham, 2004). Наиболее сложная ситуация складывается при говорении диктора с нарушениями слуха в шумной обстановке, когда осуществление слухового обратного контроля затруднено обоими условиями. Можно ожидать, что изменения спектрально-амплитудных характеристик голоса в такой ситуации будут наиболее значительными.

Данная работа поддержана средствами Российского научного фонда, проект № 22-25-00068.

Авторы выражают благодарность И.Г. Андреевой за консультации при написании статьи.

#### ВКЛАД АВТОРОВ В ПУБЛИКАЦИЮ

Сбор данных научной литературы, написание и редактирование работы выполнено А.М. Луничкиным и К.С. Штин.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Н.Г., Куликов Г.А. Характеристика певческих гласных при разной частоте основного тона. *Сенсорные системы*. 2004. Т. 18. № 2. С. 172–179.
- Луничкин А.М., Андреева И.Г., Зайцева Л.Г., Гвоздева А.П., Огородникова Е.А. Изменение спектральных характеристик гласных звуков в русской речи на фоне шума. *Акустический Журнал*. 2023. Т. 69.

№. 3. С. 340–350.

<https://doi.org/10.31857/S032079192110018X>

- Штин К.С., Луничкин А.М., Гвоздева А.П., Голованова Л.Е., Андреева И.Г. Спектральные характеристики кардинальных гласных звуков как показатели слухоречевой обратной связи у пациентов с постлингвальной хронической сенсоневральной тугоухостью II и III степени. *Российский физиологический журнал*. 2023. Т. 109. № 4. С. 489–501.  
<https://doi.org/10.31857/S0869813923040106>
- Alghamdi N., Maddock S., Marxer R., Barker J., Brown G. A corpus of audio-visual Lombard speech with frontal and profile views. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. V. 143 (6). P. 523–529.  
<https://doi.org/10.1121/1.5042758>
- Amazi D.K., Garber S.R. The Lombard sign as a function of age and task. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 1982. V. 25 (4). P. 581–585.  
<https://doi.org/10.1044/jshr.2504.581>
- Anand S., Gutierrez D., Bottalico P. Acoustic-perceptual correlates of voice among steam train engineers: effects of noise and hearing protection. *Journal of voice: official journal of the Voice Foundation*. 2023. V. 37 (3). P. 366–373.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.01.006>
- Bond Z., Moore T., Gable B. Acoustic-phonetic characteristics of speech produced in noise and while wearing an oxygen mask. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1989. V. 85 (2). P. 907–912.  
<https://doi.org/10.1121/1.397563>
- Bottalico P. Lombard effect, ambient noise, and willingness to spend time and money in a restaurant. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. V. 144 (3). P. 209–214.  
<https://doi.org/10.1121/1.5055018>
- Bottalico P., Graetzer S., Hunter E.J. Effect of training and level of external auditory feedback on the singing voice: volume and quality. *Journal of Voice*. 2016. V. 30 (4). P. 434–442.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2015.05.010>
- Bottalico P., Passione I., Graetzer S., Hunter E. Evaluation of the starting point of the Lombard effect. *Acta Acustica United with Acustica*. 2017. V. 103 (1). P. 169–172.  
<https://doi.org/10.3813/AAA.919043>
- Bottalico P., Piper R., Legner B. Lombard effect, intelligibility, ambient noise, and willingness to spend time and money in a restaurant amongst older adults. *Scientific Reports*. 2022. V. 12 (1). P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10414-6>
- Bouchard K., Chang, E. Control of spoken vowel acoustics and the influence of phonetic context in human speech sensorimotor cortex. *Journal of Neuroscience*. 2014. V. 34 (38). P. 12662–12672.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1219-14.2014>
- Bradlow A., Torretta G., Pisoni D. Intelligibility of normal speech I: Global and fine-grained acoustic-phonetic talker characteristics. *Speech Communication*. 1996. V. 20. P. 255–272.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(96\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(96)00063-5)
- Campisi P., Low A., Papsin B., Mount R., Harrison R. Multidimensional voice program analysis in profoundly deaf children: quantifying frequency and amplitude control. *Perceptual and Motor Skills*. 2006. V. 103 (1). P. 40–50.  
<https://doi.org/10.2466/pms.103.1.40-50>

- Coelho A., Brasolotto A., Bahmad F. Development and validation of the protocol for the evaluation of voice in subjects with hearing impairment. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*. 2019. V. 86 (6). P. 748–762. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2019.05.007>
- Coelho A., Medved D., Brasolotto A. Hearing loss and Voice. In: *Update on Hearing Loss*. InTech. 2015. <https://doi.org/10.5772/61217>
- Cooke M., Lu Y. Spectral and temporal changes to speech produced in the presence of energetic and informational maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2010. V. 128 (4). P. 2059–2069. <https://doi.org/10.1121/1.3478775>
- Das B., Chatterjee I., Kumar S. Laryngeal aerodynamics in children with hearing impairment versus age and height matched normal hearing peers. *ISRN Otolaryngology*. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/394604>
- Garnier M., Bailly L., Dohen M., Welby P., Løevenbruck, H. An acoustic and articulatory study of Lombard speech: global effects on the utterance. <https://hal.science/hal-00370947.html>
- Garnier M., Dohen M., Løevenbruck H., Welby P., Bailly L. The Lombard Effect: a physiological reflex or a controlled intelligibility enhancement? <https://hal.science/hal-00214307.html>
- Garnier M., Henrich N. Speaking in noise: How does the Lombard effect improve acoustic contrasts between speech and ambient noise? *Computer Speech & Language*. 2014. V. 28 (2). P. 580–597. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2013.07.005>
- Garnier M., Henrich N., Dubois D. Influence of sound immersion and communicative interaction on the Lombard effect. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2010. V. 53 (3). P. 588–608. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/08-0138\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/08-0138))
- Garnier M., Ménard L., Alexandre B. Hyper-articulation in Lombard speech: An active communicative strategy to enhance visible speech cues? *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. V. 144 (2). P. 1059–1074. <https://doi.org/10.1121/1.5051321>
- Gautam A., Naples J., Eliades S. Control of speech and voice in cochlear implant patients. *The Laryngoscope*. 2019. V. 129 (9). P. 2158–2163. <https://doi.org/10.1002/lary.27787>
- Gervain J., Mehler J. Speech perception and language acquisition in the first year of life. *Annual Review of Psychology*. 2010. V. 61. P. 191–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.100408>
- Graven S., Brown J. Auditory development in the fetus and infant. *Newborn and Infant Nursing Reviews; NAINR*. 2008. V. 8 (4). P. 187–193. <https://doi.org/10.1053/j.nainr.2008.10.010>
- Guenther F. *Neural control of speech*. London, England, The MIT Press. 2016. 420 p.
- Guenther F. Speech sound acquisition, coarticulation and rate effects in a neural network model of speech production. *Psychological Review*. 1995. V. 102 (3). P. 594–621. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.102.3.594>
- Guenther F., Ghosh S., Tourville J. Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain & Language*. 2006. V. 96 (3). P. 280–301. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.06.001>
- Guenther F., Vladusich T. A neural theory of speech acquisition and production. *Journal of Neurolinguistics*. 2012. V. 25 (5). P. 408–422. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2009.08.006>
- Hadley L., Brimijoin W., Whitmer W. Speech, movement, and gaze behaviours during dyadic conversation in noise. *Scientific reports*. 2019. V. 9 (1). P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46416-0>
- Hage S., Jürgens U., Ehret G. Audio–vocal interaction in the pontine brainstem during self-initiated vocalization in the squirrel monkey. *European Journal of Neuroscience*. 2006. V. 23 (12). P. 3297–3308. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.04835.x>
- Hage S., Nieder A. Dual neural network model for the evolution of speech and language. *Trends in neurosciences*. 2016. V. 39 (12). P. 813–829. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.10.006>
- Halfwerk W., Lea A., Guerra M., Page R., Ryan M. Vocal responses to noise reveal the presence of the Lombard effect in a frog. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 2006. V. 27. P. 669–676. <https://doi.org/10.1093/beheco/arv204>
- Hazan V., Baker R. Acoustic-phonetic characteristics of speech produced with communicative intent to counter adverse listening conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2011. V. 130 (4). P. 2139–2152. <https://doi.org/10.1121/1.3623753>
- Hazan V., Markham D. Acoustic-phonetic correlates of talker intelligibility for adults and children. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2004. V. 116 (5). P. 3108–3118. <https://doi.org/10.1121/1.1806826>
- Higgins M., Carney A., Schulte L. Physiological assessment of speech and voice production of adults with hearing loss. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1994. V. 37 (3). P. 510–521. <https://doi.org/10.1044/jshr.3703.510>
- Hocevar-Boltezar I., Vatovec J., Gros A., Zagri M. The influence of cochlear implantation on some voice parameters. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*. 2005. V. 69 (12). P. 1635–1640. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2005.03.045>
- Holt D., Johnston C. Evidence of the Lombard effect in fishes. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 2014. V. 25. P. 819–826. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru028>
- Hotchkin C., Parks S. The Lombard effect and other noise-induced vocal modifications: insight from mammalian communication systems. *Biological Reviews*. 2013. V. 88 (4). P. 809–824. <https://doi.org/10.1111/brv.12026>
- Huber J., Chandrasekaran B. Effects of increasing sound pressure level on lip and jaw movement parameters and consistency in young adults. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2006. V. 49 (6). P. 1368. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2006/098\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2006/098))
- Ito T., Ostry D. Somatosensory contribution to motor learning due to facial skin deformation. *Journal of Neurophysiology*. 2010. V. 104 (3). P. 1230–1238. <https://doi.org/10.1152/jn.00199.2010>
- Jokinen E., Remes U., Alku P. The use of read versus conversational Lombard speech in spectral tilt modeling for intelligibility enhancement in near-end noise conditions. *Interspeech*. 2016. P. 2771–2775. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2016-143>

- Junqua J. The Lombard reflex and its role on human listeners and automatic speech recognizers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. V. 93. P. 510–524. <https://doi.org/10.1121/1.405631>
- Junqua J., Fincke S., Field K. The Lombard effect: A reflex to better communicate with others in noise. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings*. 1999. V. 4. P. 2083–2086. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1999.758343>
- Keough D., Hawco C., Jones J. Auditory-motor adaptation to frequency-altered auditory feedback occurs when participants ignore feedback. *BMC Neuroscience*. 2013. V. 9. P. 14–25. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-25>
- Kim J., Davis C., Vignali G., Hill H. A visual concomitant of the Lombard reflex. *AVSP*. 2005. P. 17–22.
- Kleczkowski P., Żak A., Król-Nowak A. Lombard effect in Polish speech and its comparison in English speech. *Archives of Acoustics*. 2017. V. 42 (4). P. 561–569. <https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0060>
- Lam J., Tjaden K. Intelligibility of clear speech: Effect of instruction. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2013. V. 56 (5). P. 1429–1440. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2013/12-0335\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2013/12-0335))
- Lane H., Tranel B. The Lombard sign and the role of hearing in speech. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1971. V. 14 (4). P. 677–709. <https://doi.org/10.1044/jshr.1404.677>
- Larson C., Altman K., Liu H., Hain T. Interactions between auditory and somatosensory feedback for voice F0 control. *Experimental Brain Research*. 2008. V. 187 (4). P. 613–621. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1330-z>
- Lau P. The Lombard Effect as a communicative phenomenon. UC Berkeley PhonLab *Annual Report*. 2008. V. 4 (4). <https://doi.org/10.5070/P719j8j0b6>
- Lee G. Variability in voice fundamental frequency of sustained vowels in speakers with sensorineural hearing loss. *Journal of Voice*. 2012. V. 26 (1). P. 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2010.10.003>
- Lee S., Potamianos A., Narayanan S. Acoustics of children's speech: Developmental changes of temporal and spectral parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1999. V. 105 (3). P. 1455–1468. <https://doi.org/10.1121/1.426686>
- Lee S., Yu J., Fang T., Lee G. Vocal fold nodules: a disorder of phonation organs or auditory feedback? *Clinical Otolaryngology*. 2019. V. 44 (6). P. 975–982. <https://doi.org/10.1111/coa.13417>
- Letowski T., Frank T., Caravella J. Acoustical properties of speech produced in noise presented through supra-aural earphones. *Ear and Hearing*. 1993. V. 14 (5). P. 332–338. <https://doi.org/10.1097/00003446-199310000-00004>
- Lieberman A., Mattingly I. The motor theory of speech perception revised. *Cognition*. 1985. V. 21. P. 1–36. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90021-6)
- Lu Y., Cooke M. Speech production modifications produced by competing talkers, babble, and stationary noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2008. V. 124. P. 3261–3275. <https://doi.org/10.1121/1.2990705>
- Lu Y., Cooke M. Speech production modifications produced in the presence of low-pass and high-pass filtered noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2009. V. 126. P. 1495–1499. <https://doi.org/10.1121/1.2990705>
- Lu Y., Cooke M. The contribution of changes in F0 and spectral tilt to increased intelligibility of speech produced in noise. *Speech Communication*. 2009. V. 51. P. 1253–1262. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2009.07.002>
- Luo J., Hage S.R., Moss C.F. The Lombard effect: from acoustics to neural mechanisms. *Trends in Neurosciences*. 2018. V. 41 (12). P. 938–949. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.07.011>
- Marcoux K., Ernestus M. *Pitch in native and non-native Lombard speech*. 19th International Congress of Phonetic Sciences. Australasian Speech Science and Technology Association Inc. 2019. P. 2605–2609.
- Matsumoto S., Akagi M. Variation of Formant Amplitude and Frequencies in Vowel Spectrum uttered under Various Noisy Environments. <http://hdl.handle.net/10119/15772.html>
- Meekings S., Evans S., Lavan N. Distinct neural systems recruited when speech production is modulated by different masking sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. V. 140 (1). P. 8–19. <https://doi.org/10.1121/1.4948587>
- Meekings S., Scott S.K. Error in the superior temporal gyrus? A systematic review and activation likelihood estimation meta-analysis of speech production studies. *J. Cogn. Neurosci*. 2021. V. 33 (3). P. 422–444. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01661](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01661)
- Mermelstein P. Articulatory model for the study of speech production. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1973. V. 53 (4). P. 1070–1082. <https://doi.org/10.1121/1.1913427>
- Nonaka S., Takahashi R., Enomoto K. Lombard reflex during PAG-induced vocalization in decerebrate cats. *Journal of Neuroscience Research*. 1997. V. 29 (4). P. 283–289. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(97\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(97)00097-7)
- Patel R., Schell K.W. The Influence of Linguistic Content on the Lombard Effect. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2008. V. 51. P. 209–220. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/016\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/016))
- Perkell J. Five decades of research in speech motor control: what have we learned, and where should we go from here? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2013. V. 56 (6). P. 1857–1874. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2013/12-0382\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2013/12-0382))
- Perkell J. Movement goals and feedback and feedforward control mechanisms in speech production. *Journal of Neurolinguistics*. 2012. V. 25. P. 382–407. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2010.02.011>
- Perrier P., Ostry D., Laboisière R. The equilibrium point hypothesis and its application to speech motor control. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1996. V. 39 (2). P. 365–378. <https://doi.org/10.1044/jshr.3902.365>
- Pick H., Siegel G., Fox P., Garber S., Kearney J. Inhibiting the Lombard effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1989. V. 85 (2). P. 894–900. <https://doi.org/10.1121/1.397561>
- Pittman A., Wiley T. Recognition of speech produced in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2001. V. 44 (3). P. 487–496. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2001/038\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2001/038))

- Schenk B., Baumgartner W., Hamzavi J. Effect of the loss of auditory feedback on segmental parameters of vowels of postlingually deafened speakers. *Auris Nasus Larynx*. 2003. V. 30 (4). P. 333–339.  
[https://doi.org/10.1016/s0385-8146\(03\)00093-2](https://doi.org/10.1016/s0385-8146(03)00093-2)
- Schwartz J., Boë J., Vallée N., Abry C. The dispersion-focalization theory of vowel systems. *Journal of Phonetics*. 1997. V. 25. P. 255–286.
- Selleck M., Sataloff R. The impact of the auditory system on phonation: a review. *Journal of Voice*. 2014. V. 28 (6). P. 688–693.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2014.03.018>
- Shen C., Cooke M., Janse E. Speaking in the presence of noise: Consistency of acoustic properties in clear-Lombard speech over time. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2023. V. 153 (4). P. 2165–2165.  
<https://doi.org/10.1121/10.0017769>
- Siegel G., Pick H., Olsen M., Sawin L. Auditory feedback on the regulation of vocal intensity of preschool children. *Developmental Psychology*. 1976. V. 12 (3). P. 255.  
<https://doi.org/10.1037/0012-1649.12.3.255>
- Šimko J., Beňuš Š., Vainio M. Hyperarticulation in Lombard speech: Global coordination of the jaw, lips and the tongue. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. V. 139 (1). P. 151–162.  
<https://doi.org/10.1121/1.4939495>
- Smith B., Kenney M., Hussain S. A longitudinal investigation of duration and temporal variability in children's speech production. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1996. V. 99 (4). P. 2344–2349.  
<https://doi.org/10.1121/1.415421>
- Smith B., Sugarman M., Long S. Experimental manipulation of speaking rate for studying temporal variability in children's speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1983. V. 74 (3). P. 744–749.  
<https://doi.org/10.1121/1.389860>
- Stathopoulos E., Duchan J., Sonnenmeier R., Bruce N. Intonation and pausing in deaf speech. *Folia Phoniat.* 1986. V. 38 (1). P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1159/000265814>
- Stowe L., Golob E. Evidence that the Lombard effect is frequency-specific in humans. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. V. 134 (1). P. 640–647.  
<https://doi.org/10.1121/1.4807645>
- Summers W., Pisoni D., Bernacki R., Pedlow R., Stokes M. Effects of noise on speech production: Acoustic and perceptual analyses. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1988. V. 84 (3). P. 917–928.  
<https://doi.org/10.1121/1.396660>
- Svirsky M., Lane H., Perkell J., Wozniak J. Effects of short-term auditory deprivation on speech production in adult cochlear implant users. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1992. V. 92 (3). P. 1284–1300.  
<https://doi.org/10.1121/1.403923>
- Szkiełkowska A., Myszel K. Acoustic voice parameters in hearing-impaired, school-aged children. Research study outcomes. *Journal of Clinical Otorhinolaryngology*. 2021. V. 3 (3).  
<https://doi.org/10.31579/2692-9562/034>
- Tang P., Xu Rattanasone N., Yuen I., Demuth K. Phonetic enhancement of Mandarin vowels and tones: Infant-directed speech and Lombard speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. V. 142 (2). P. 493–503.  
<https://doi.org/10.1121/1.4995998>
- Therrien A., Lyons J., Balasubramaniam R. Sensory attenuation of self-produced feedback: the lombard effect revisited. *PLoS One*. 2012. V. 7 (11). P. 1–7.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049370>
- Tonkinson S. The Lombard effect in choral singing. *Journal of Voice*. 1994. V. 8 (1). P. 24–29.  
[https://doi.org/10.1016/S0892-1997\(05\)80316-9](https://doi.org/10.1016/S0892-1997(05)80316-9)
- Tourville J., Guenther F. The DIVA model: a neural theory of speech acquisition and production. *Language and cognitive processes*. 2011. V. 26 (7). P. 952–981.  
<https://doi.org/10.1080/01690960903498424>
- Tourville J., Reilly K., Guenther F. Neural mechanisms underlying auditory feedback control of speech. *NeuroImage*. 2007. V. 39 (3). P. 1429–1443.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.09.054>
- Ubrig M., Tsuji R., Weber R., Menezes M., Barrichelo V., Cunha M., Tsuji D., Goffi-Gomez M. The influence of auditory feedback and vocal rehabilitation on prelingual hearing-impaired individuals post cochlear implant. *Journal of Voice*. 2018. V. 33 (6). P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2018.07.004>
- Vainio M., Aalto D., Suni A., Arnhold A., Raitio T., Seijo H., Järvikivi J., Alku P. Effect of noise type and level on focus related fundamental frequency changes. <http://interspeech2012.org/accepted-abstract.html?id=952.html>.
- Van Ngo T., Kubo R., Morikawa D., Akagi M. Acoustical analyses of tendencies of intelligibility in Lombard speech with different background noise levels. *Journal of Signal Processing*. 2017. V. 21 (4). P. 171–174.  
<https://doi.org/10.2299/jsp.21.171>
- Vance M., Stackhouse J., Wells B. Speech-production skills in children aged 3–7 years. *International Journal of Language & Communication Disorders*. 2005. V. 40 (1). P. 29–48.  
<https://doi.org/10.1080/13682820410001716172>
- Villacorta V., Perkell J., Guenther F. Sensorimotor adaptation to feedback perturbations of vowel acoustics and its relation to perception. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2007. V. 122. P. 2306–2319.  
<https://doi.org/10.1121/1.2773966>
- Voelker C. A preliminary strobophotographic study of the speech of the deaf. *American Annals of the Deaf*. 1935. V. 80. P. 243–259.
- Wyke B. Laryngeal myotatic reflexes and phonation. *Folia Phoniatr.* 1974. V. 26 (4). P. 249–264.  
<https://doi.org/10.1159/000263784>
- Zamani P., Bayat A., Saki N., Atee E., Bagheripour H. Post-lingual deaf adult cochlear implant users' speech and voice characteristics: cochlear implant turned-on versus turned-off. *Acta Oto-Laryngologica*. 2021. V. 141 (4). P. 367–373.  
<https://doi.org/10.1080/00016489.2020.1866778>
- Zhao Y., Jurafsky D. The effect of lexical frequency and Lombard reflex on tone hyperarticulation. *Journal of Phonetics*. 2009. V. 37 (2). P. 231–247.  
<https://doi.org/10.1016/j.wocn.2009.03.002>
- Zollinger S.A., Brumm H. The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research. *Behaviour*. 2011. V. 148 (11–13). P. 1173–1198. .  
<https://doi.org/10.1163/000579511X605759>

## The role of auditory feedback in voice control with normal and impaired hearing

A. M. Lunichkin<sup>a,#</sup> and K. S. Shtin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> I. M. Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry RAS  
194223 Saint-Petersburg, pr. Torez, 44, Russia

<sup>#</sup> E-mail: BolverkDC@mail.ru

Control of speech fulfilled by cooperation between feedforward control and feedback control. Feedforward control activates program of articulation, whereas feedback control carries acoustic and sensorimotor information about pronounced utterance. Their complementary speech control function described by the DIVA model, which based on adjustment of auditory and proprioceptive signals relatively to program of articulation in nerve centers. The inconsistency between the sensory information received via feedback and the presentation of the acoustic signal in the auditory nucleus causes corrective commands. Auditory feedback is necessary for the correct development of children's articulatory skills, i.e. forming feedforward control. For this reason, prelingually deafened adults have significant articulation impairments due to immature articulatory skills. In postlingual deafness, the previously forming feedforward control allows pronounce phonemes successfully. However, in people with sensorineural hearing loss, control of phonation and articulation through the auditory feedback deteriorates, which expressed by an increase of voice intensity, changes in the speech spectral characteristics and instability in frequency and amplitude. Similar speech changes are found in speakers with normal hearing in the presence of noise that masks the speaker's voice (Lombard effect). In noise, voice intensity increase, spectral characteristics of speech shift to the high-frequency region, and increase the amplitude and speed of articulatory movements (hyperarticulation). This speech reorganization is an adaptation of the speaker's own voice to background noise, which purpose is to unmask the speech and restore auditory feedback control.

**Key words:** audiomotor control, feedback control, speech, voice, Lombard effect, sensorineural hearing loss, DIVA model

### REFERENCES

- Andreeva I.G., Kulicov G.A. *Charakteristika pevcheskikh glasnoch pri raznoi chastote osnovnogo tona* [Sung vowels' characteristics under different fundamental frequency]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2004. V. 18 (2). P. 172–179 (in Russian).
- Lunichkin A.M., Andreeva I.G., Zaitseva L.G., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A. *Izmenenie spektralnykh karakteristik glasnoch zvukov v russkoi rechi na fone schuma* [Changes in the spectral characteristics of vowels in Russian speech on a noise background]. *Acusticheskii zhurnal* [Acoustical Journal]. 2023. V. 69 (3). P. 357–366 (in Russian).  
<https://doi.org/10.1134/S1063771023600237>
- Shtin K.S., Lunichkin A.M., Gvozdeva A.P., L. Golovanova L.E., Andreeva I.G. *Spektralnyye karakteristiki kardinalnykh glasnoch zvukov kak pokazateli sluchorechevoi obratnoi svyazi u pacientov s postlingvalinoi chronicheskoi senseonevralinoi tugouchostiy 2 i 3 stepeni* [Spectral characteristics of cardinal vowels as indicators of the auditory speech feedback control in patients with moderate and moderately severe chronic postlingual sensorineural hearing loss]. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal* [Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology]. 2023. V. 59 (4). P. 596–606.  
<https://doi.org/10.31857/S0869813923040106> (in Russian)
- Alghamdi N., Maddock S., Marxer R., Barker J., Brown G. A corpus of audio-visual Lombard speech with frontal and profile views. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. V. 143 (6). P. 523–529.  
<https://doi.org/10.1121/1.5042758>
- Amazi D.K., Garber S.R. The Lombard sign as a function of age and task. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 1982. V. 25 (4). P. 581–585.  
<https://doi.org/10.1044/jshr.2504.581>
- Anand S., Gutierrez D., Botalico P. Acoustic-perceptual correlates of voice among steam train engineers: effects of noise and hearing protection. *Journal of voice: official journal of the Voice Foundation*. 2023. V. 37 (3). P. 366–373.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.01.006>
- Bond Z., Moore T., Gable B. Acoustic-phonetic characteristics of speech produced in noise and while wearing an oxygen mask. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1989. V. 85 (2). P. 907–912.  
<https://doi.org/10.1121/1.397563>
- Botalico P. Lombard effect, ambient noise, and willingness to spend time and money in a restaurant. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. V. 144 (3). P. 209–214. <https://doi.org/10.1121/1.5055018>
- Botalico P., Graetzer S., Hunter E. J. Effect of training and level of external auditory feedback on the singing voice: volume and quality. *Journal of Voice*. 2016. V. 30 (4). P. 434–442.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2015.05.010>
- Botalico P., Passione I., Graetzer S., Hunter E. Evaluation of the starting point of the Lombard effect. *Acta acustica united with acustica*. 2017. V. 103 (1). P. 169–172.  
<https://doi.org/10.3813/AAA.919043>
- Botalico P., Piper R., Legner B. Lombard effect, intelligibility, ambient noise, and willingness to spend time and money in a restaurant amongst older adults. *Scientific Reports*. 2022. V. 12 (1). P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10414-6>
- Bouchard K., Chang E. Control of spoken vowel acoustics and the influence of phonetic context in human speech sensorimotor cortex. *Journal of Neuroscience*. 2014.

- V. 34 (38). P. 12662–12672.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1219-14.2014>
- Bradlow A., Torretta G., Pisoni D. Intelligibility of normal speech I: Global and fine-grained acoustic-phonetic talker characteristics. *Speech Communication*. 1996. V. 20. P. 255–272.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(96\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(96)00063-5)
- Campisi P., Low A., Papsin B., Mount R., Harrison R. Multidimensional voice program analysis in profoundly deaf children: quantifying frequency and amplitude control. *Perceptual and Motor Skills*. 2006. V. 103 (1). P. 40–50. <https://doi.org/10.2466/pms.103.1.40-50>.
- Coelho A., Brasolotto A., Bahmad F. Development and validation of the protocol for the evaluation of voice in subjects with hearing impairment. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*. 2019. V. 86 (6). P. 748–762. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2019.05.007>
- Coelho A., Medved D., Brasolotto A. *Hearing loss and Voice*. In: Update on Hearing Loss. InTech. 2015. <https://doi.org/10.5772/61217>
- Cooke M., Lu Y. Spectral and temporal changes to speech produced in the presence of energetic and informational maskers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2010. V. 128 (4). P. 2059–2069. <https://doi.org/10.1121/1.3478775>
- Das B., Chatterjee I., Kumar S. Laryngeal aerodynamics in children with hearing impairment versus age and height matched normal hearing peers. *ISRN Otolaryngology*. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/394604>
- Garnier M., Bailly L., Dohen M., Welby P., Loevenbruck H. An acoustic and articulatory study of Lombard speech: global effects on the utterance. URL: <https://hal.science/hal-00370947.html>
- Garnier M., Dohen M., Loevenbruck H., Welby P., Bailly L. The Lombard Effect: a physiological reflex or a controlled intelligibility enhancement? URL: <https://hal.science/hal-00214307.html>
- Garnier M., Henrich N. Speaking in noise: How does the Lombard effect improve acoustic contrasts between speech and ambient noise? *Computer Speech & Language*. 2014. V. 28 (2). P. 580–597. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2013.07.005>
- Garnier M., Henrich N., Dubois D. Influence of sound immersion and communicative interaction on the Lombard effect. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2010. V. 53 (3). P. 588–608. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/08-0138\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/08-0138))
- Garnier M., Ménard L., Alexandre B. Hyper-articulation in Lombard speech: An active communicative strategy to enhance visible speech cues? *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. V. 144 (2). P. 1059–1074. <https://doi.org/10.1121/1.5051321>
- Gautam A., Naples J., Eliades S. Control of speech and voice in cochlear implant patients. *The Laryngoscope*. 2019. V. 129 (9). P. 2158–2163. <https://doi.org/10.1002/lary.27787>
- Gervain J., Mehler J. Speech perception and language acquisition in the first year of life. *Annual Review of Psychology*. 2010. V. 61. P. 191–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.100408>
- Graven S., Brown J. Auditory development in the fetus and infant. *Newborn and Infant Nursing Reviews; NAINR*. 2008. V. 8 (4). P. 187–193. <https://doi.org/10.1053/j.nainr.2008.10.010>
- Guenter F. *Neural control of speech*. London, England, The MIT Press. 2016. 420 p.
- Guenther F. Speech sound acquisition, coarticulation and rate effects in a neural network model of speech production. *Psychological Review*. 1995. V. 102 (3). P. 594–621. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.102.3.594>
- Guenther F., Ghosh S., Tourville J. Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain & Language*. 2006. V. 96 (3). P. 280–301. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.06.001>
- Guenther F., Vladusich T. A neural theory of speech acquisition and production. *Journal of Neurolinguistics*. 2012. V. 25 (5). P. 408–422. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2009.08.006>
- Hadley L., Brimijoin W., Whitmer W. Speech, movement, and gaze behaviours during dyadic conversation in noise. *Scientific reports*. 2019. V. 9 (1). P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46416-0>
- Hage S., Jürgens U., Ehret G. Audio–vocal interaction in the pontine brainstem during self-initiated vocalization in the squirrel monkey. *European Journal of Neuroscience*. 2006. V. 23 (12). P. 3297–3308. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.04835.x>
- Hage S., Nieder A. Dual neural network model for the evolution of speech and language. *Trends in neurosciences*. 2016. V. 39 (12). P. 813–829. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.10.006>
- Halfwerk W., Lea A., Guerra M., Page R., Ryan M. Vocal responses to noise reveal the presence of the Lombard effect in a frog. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 2006. V. 27. P. 669–676. <https://doi.org/10.1093/beheco/arv204>
- Hazan V., Baker R. Acoustic-phonetic characteristics of speech produced with communicative intent to counter adverse listening conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2011. V. 130 (4). P. 2139–2152. <https://doi.org/10.1121/1.3623753>
- Hazan V., Markham D. Acoustic-phonetic correlates of talker intelligibility for adults and children. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2004. V. 116 (5). P. 3108–3118. <https://doi.org/10.1121/1.1806826>
- Higgins M., Carney A., Schulte L. Physiological assessment of speech and voice production of adults with hearing loss. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1994. V. 37 (3). P. 510–521. <https://doi.org/10.1044/jshr.3703.510>
- Hocevar-Boltezar I., Vatovec J., Gros A., Zagri M. The influence of cochlear implantation on some voice parameters. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*. 2005. V. 69 (12). P. 1635–1640. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2005.03.045>
- Holt D., Johnston C. Evidence of the Lombard effect in fishes. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 2014. V. 25. P. 819–826. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru028>
- Hotchkiss C., Parks S. The Lombard effect and other noise-induced vocal modifications: insight from mammalian communication systems. *Biological Reviews*. 2013. V. 88 (4). P. 809–824. <https://doi.org/10.1111/brv.12026>
- Huber J., Chandrasekaran B. Effects of increasing sound pressure level on lip and jaw movement parameters and consistency in young adults. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2006. V. 49 (6). P. 1368. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2006/098\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2006/098))
- Ito T., Ostry D. Somatosensory contribution to motor learning due to facial skin deformation. *Journal of Neu-*

- rophysiology*. 2010. V. 104 (3). P. 1230–1238.  
<https://doi.org/10.1152/jn.00199.2010>
- Jokinen E., Remes U., Alku P. The use of read versus conversational Lombard speech in spectral tilt modeling for intelligibility enhancement in near-end noise conditions. *Interspeech*. 2016. P. 2771–2775.  
<https://doi.org/10.21437/Interspeech.2016-143>
- Junqua J. The Lombard reflex and its role on human listeners and automatic speech recognizers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. V. 93. P. 510–524.  
<https://doi.org/10.1121/1.405631>
- Junqua J., Fincke S., Field K. The Lombard effect: A reflex to better communicate with others in noise. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings*. 1999. V. 4. P. 2083–2086.  
<https://doi.org/10.1109/ICASSP.1999.758343>
- Keough D., Hawco C., Jones J. Auditory-motor adaptation to frequency-altered auditory feedback occurs when participants ignore feedback. *BMC Neuroscience*. 2013. V. 9. P. 14–25. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-25>
- Kim J., Davis C., Vignali G., Hill H. A visual concomitant of the Lombard reflex. *AVSP*. 2005. P. 17–22.
- Kleczkowski P., Żak A., Król-Nowak A. Lombard effect in Polish speech and its comparison in English speech. *Archives of Acoustics*. 2017. V. 42 (4). P. 561–569.  
<https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0060>
- Lam J., Tjaden K. Intelligibility of clear speech: Effect of instruction. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2013. V. 56 (5). P. 1429–1440.  
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2013\)12-0335](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2013)12-0335)
- Lane H., Tranel B. The Lombard sign and the role of hearing in speech. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1971. V. 14 (4). P. 677–709.  
<https://doi.org/10.1044/jshr.1404.677>
- Larson C., Altman K., Liu H., Hain T. Interactions between auditory and somatosensory feedback for voice F0 control. *Experimental Brain Research*. 2008. V. 187 (4). P. 613–621.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-008-1330-z>
- Lau P. The Lombard Effect as a communicative phenomenon. *UC Berkeley PhonLab Annual Report*. 2008. V. 4 (4). <https://doi.org/10.5070/P719j8j0b6>
- Lee G. Variability in voice fundamental frequency of sustained vowels in speakers with sensorineural hearing loss. *Journal of Voice*. 2012. V. 26 (1). P. 24–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2010.10.003>
- Lee S., Potamianos A., Narayanan S. Acoustics of children's speech: Developmental changes of temporal and spectral parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1999. V. 105 (3). P. 1455–1468.  
<https://doi.org/10.1121/1.426686>
- Lee S., Yu J., Fang T., Lee G. Vocal fold nodules: a disorder of phonation organs or auditory feedback? *Clinical Otolaryngology*. 2019. V. 44 (6). P. 975–982.  
<https://doi.org/10.1111/coa.13417>
- Letowski T., Frank T., Caravella J. Acoustical properties of speech produced in noise presented through supra-aural earphones. *Ear and Hearing*. 1993. V. 14 (5). P. 332–338. <https://doi.org/10.1097/00003446-199310000-00004>
- Liberman A., Mattingly I. The motor theory of speech perception revised. *Cognition*. 1985. V. 21. P. 1–36.  
[https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90021-6)
- Lu Y., Cooke M. Speech production modifications produced by competing talkers, babble, and stationary noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2008. V. 124. P. 3261–3275.  
<https://doi.org/10.1121/1.2990705>
- Lu Y., Cooke M. Speech production modifications produced in the presence of low-pass and high-pass filtered noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2009. V. 126. P. 1495–1499.  
<https://doi.org/10.1121/1.2990705>
- Lu Y., Cooke M. The contribution of changes in F0 and spectral tilt to increased intelligibility of speech produced in noise. *Speech Communication*. 2009. V. 51. P. 1253–1262.  
<https://doi.org/10.1016/j.specom.2009.07.002>
- Luo J., Hage S.R., Moss C.F. The Lombard effect: from acoustics to neural mechanisms. *Trends in neurosciences*. 2018. V. 41 (12). P. 938–949.  
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.07.011>
- Marcoux K., Ernestus M. Pitch in native and non-native Lombard speech. 19th International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS 2019). *Australasian Speech Science and Technology Association Inc.* 2019. P. 2605–2609.
- Matsumoto S., Akagi M. Variation of Formant Amplitude and Frequencies in Vowel Spectrum uttered under Various Noisy Environments. URL: <http://hdl.handle.net/10119/15772.html>
- Meekings S., Evans S., Lavan N. Distinct neural systems recruited when speech production is modulated by different masking sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. V. 140 (1). P. 8–19.  
<https://doi.org/10.1121/1.4948587>
- Meekings S., Scott S.K. Error in the superior temporal gyrus? A systematic review and activation likelihood estimation meta-analysis of speech production studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2021. V. 33 (3). P. 422–444. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01661](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01661)
- Mermelstein P. Articulatory model for the study of speech production. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1973. V. 53 (4). P. 1070–1082.  
<https://doi.org/10.1121/1.1913427>
- Nonaka S., Takahashi R., Enomoto K. Lombard reflex during PAG-induced vocalization in decerebrate cats. *Journal of Neuroscience Research*. 1997. V. 29 (4). P. 283–289.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(97\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(97)00097-7)
- Patel R., Schell K.W. The Influence of Linguistic Content on the Lombard Effect. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2008. V. 51. P. 209–220.  
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008\)016](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008)016)
- Perkell J. Five decades of research in speech motor control: what have we learned, and where should we go from here? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2013. V. 56 (6). P. 1857–1874.  
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2013\)12-0382](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2013)12-0382)
- Perkell J. Movement goals and feedback and feedforward control mechanisms in speech production. *Journal of Neurolinguistics*. 2012. V. 25. P. 382–407.  
<https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2010.02.011>
- Perrier P., Ostry D., Laboisière R. The equilibrium point hypothesis and its application to speech motor control. *Journal of Speech and Hearing Research*. 1996. V. 39 (2). P. 365–378. <https://doi.org/10.1044/jshr.3902.365>
- Pick H., Siegel G., Fox P., Garber S., Kearney J. Inhibiting the Lombard effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1989. V. 85 (2). P. 894–900.  
<https://doi.org/10.1121/1.397561>

- Pittman A., Wiley T. Recognition of speech produced in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2001. V. 44 (3). P. 487–496. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2001/038\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2001/038))
- Schenk B., Baumgartner W., Hamzavi J. Effect of the loss of auditory feedback on segmental parameters of vowels of postlingually deafened speakers. *Auris Nasus Larynx*. 2003. V. 30 (4). P. 333–339. [https://doi.org/10.1016/s0385-8146\(03\)00093-2](https://doi.org/10.1016/s0385-8146(03)00093-2)
- Schwartz J., Boë J., Vallée N., Abry C. The dispersion-focalization theory of vowel systems. *Journal of Phonetics*. 1997. V. 25. P. 255–286.
- Selleck M., Sataloff R. The impact of the auditory system on phonation: a review. *Journal of Voice*. 2014. V. 28 (6). P. 688–693. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2014.03.018>
- Shen C., Cooke M., Janse E. Speaking in the presence of noise: Consistency of acoustic properties in clear-Lombard speech over time. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2023. V. 153 (4). P. 2165–2165. <https://doi.org/10.1121/10.0017769>
- Siegel G., Pick H., Olsen M., Sawin L. Auditory feedback on the regulation of vocal intensity of preschool children. *Developmental Psychology*. 1976. V. 12 (3). P. 255. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.12.3.255>
- Šimko J., Beňuš Š., Vainio M. Hyperarticulation in Lombard speech: Global coordination of the jaw, lips and the tongue. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2016. V. 139 (1). P. 151–162. <https://doi.org/10.1121/1.4939495>
- Smith B., Kenney M., Hussain S. A longitudinal investigation of duration and temporal variability in children's speech production. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1996. V. 99 (4). P. 2344–2349. <https://doi.org/10.1121/1.415421>
- Smith B., Sugarman M., Long S. Experimental manipulation of speaking rate for studying temporal variability in children's speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1983. V. 74 (3). P. 744–749. <https://doi.org/10.1121/1.389860>
- Stathopoulos E., Duchan J., Sonnenmeier R., Bruce N. Intonation and pausing in deaf speech. *Folia Phoniat.* 1986. V. 38 (1). P. 1–12. <https://doi.org/10.1159/000265814>
- Stowe L., Golob E. Evidence that the Lombard effect is frequency-specific in humans. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. V. 134 (1). P. 640–647. <https://doi.org/10.1121/1.4807645>
- Summers W., Pisoni D., Bernacki R., Pedlow R., Stokes M. Effects of noise on speech production: Acoustic and perceptual analyses. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1988. V. 84 (3). P. 917–928. <https://doi.org/10.1121/1.396660>
- Svirsky M., Lane H., Perkell J., Wozniak J. Effects of short-term auditory deprivation on speech production in adult cochlear implant users. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1992. V. 92 (3). P. 1284–1300. <https://doi.org/10.1121/1.403923>
- Szkiełkowska A., Myszel K. Acoustic voice parameters in hearing-impaired, school-aged children. Research study outcomes. *Journal of Clinical Otorhinolaryngology*. 2021. V. 3 (3). <https://doi.org/10.31579/2692-9562/034>
- Tang P., Xu Rattanasone N., Yuen I., Demuth K. Phonetic enhancement of Mandarin vowels and tones: Infant-directed speech and Lombard speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. V. 142 (2). P. 493–503. <https://doi.org/10.1121/1.4995998>
- Therrien A., Lyons J., Balasubramaniam R. Sensory attenuation of self-produced feedback: the Lombard effect revisited. *PLoS One*. 2012. V. 7 (11). P. 1–7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049370>
- Tonkinson S. The Lombard effect in choral singing. *Journal of Voice*. 1994. V. 8 (1). P. 24–29. [https://doi.org/10.1016/S0892-1997\(05\)80316-9](https://doi.org/10.1016/S0892-1997(05)80316-9)
- Tourville J., Guenther F. The DIVA model: a neural theory of speech acquisition and production. *Language and cognitive processes*. 2011. V. 26 (7). P. 952–981. <https://doi.org/10.1080/01690960903498424>
- Tourville J., Reilly K., Guenther F. Neural mechanisms underlying auditory feedback control of speech. *NeuroImage*. 2007. V. 39 (3). P. 1429–1443. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.09.054>
- Ubrig M., Tsuji R., Weber R., Menezes M., Barrichelo V., Cunha M., Tsuji D., Goffi-Gomez M. The influence of auditory feedback and vocal rehabilitation on prelingual hearing-impaired individuals post cochlear implant. *Journal of Voice*. 2018. V. 33 (6). P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2018.07.004>
- Vainio M., Aalto D., Suni A., Arnhold A., Raitio T., Seijo H., Järvikivi J., Alku P. Effect of noise type and level on focus related fundamental frequency changes. URL: <http://interspeech2012.org/accepted-abstract.html?id=952.html>
- Van Ngo T., Kubo R., Morikawa D., Akagi M. Acoustical analyses of tendencies of intelligibility in Lombard speech with different background noise levels. *Journal of Signal Processing*. 2017. V. 21 (4). P. 171–174. <https://doi.org/doi.org/10.2299/jsp.21.171>
- Vance M., Stackhouse J., Wells B. Speech-production skills in children aged 3–7 years. *International Journal of Language & Communication Disorders*. 2005. V. 40 (1). P. 29–48. <https://doi.org/10.1080/13682820410001716172>
- Villacorta V., Perkell J., Guenther F. Sensorimotor adaptation to feedback perturbations of vowel acoustics and its relation to perception. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2007. V. 122. P. 2306–2319. <https://doi.org/10.1121/1.2773966>
- Voelker C. A preliminary strobophotographic study of the speech of the deaf. *American Annals of the Deaf*. 1935. V. 80. P. 243–259.
- Wyke B. Laryngeal myotatic reflexes and phonation. *Folia Phoniatr.* 1974. V. 26 (4). P. 249–264. <https://doi.org/10.1159/000263784>
- Zamani P., Bayat A., Saki N., Ataee E., Bagheripour H. Post-lingual deaf adult cochlear implant users' speech and voice characteristics: cochlear implant turned-on versus turned-off. *Acta Oto-Laryngologica*. 2021. V. 141 (4). P. 367–373. <https://doi.org/10.1080/00016489.2020.1866778>
- Zhao Y., Jurafsky D. The effect of lexical frequency and Lombard reflex on tone hyperarticulation. *Journal of Phonetics*. 2009. V. 37 (2). P. 231–247. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2009.03.002>
- Zollinger S.A., Brumm H. The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research. *Behaviour*. 2011. V. 148 (11–13). P. 1173–1198. <https://doi.org/10.1163/000579511X605759>

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

© 2023 г. Е. А. Огородникова<sup>1,\*</sup>, Е. А. Клишова<sup>2</sup>, И. Г. Андреева<sup>2</sup>

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

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

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

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

\*E-mail: ogorodnikovaea@infran.ru

Поступила в редакцию 10.08.2023 г.

После доработки 04.09.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

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

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

**DOI:** 10.31857/S0235009223040054, **EDN:** ZHZRAS

### ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

#### ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ УДАЛЕННОСТИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В СЛУХОВЫХ ЦЕНТРАХ

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

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

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

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

Межсенсорные взаимодействия приобретают особое значение в периперсональном простран-

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

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

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

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

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

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

#### НАРУШЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПАТОЛОГИИ СЛУХА

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПО РАССТОЯНИЮ ПРИ НАРУШЕНИЯХ СЛУХА

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### КОМПЕНСАТОРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СЛУХА

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

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

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

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

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (темы № 075-00967-23-00 и № АААА-А18-118050790159-4).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

#### ВКЛАД АВТОРОВ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман Я.А. *Пространственный слух*. СПб.: Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН. 2011. 311 с.
- Альтман Я.А., Андреева И.Г. Восприятие приближения и удаления звукового образа под разными азимутальными углами при моноауральном прослушивании. *Сенсорные системы*. 2000. Т. 14. № 1. С. 11–17.
- Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А. *Руководство по аудиологии*. М.: ДМК Пресс, 2003. С. 360.
- Андреева И.Г. Виртуальная акустическая реальность: психоакустические исследования. *Сенсорные системы*. 2004а. Т. 18. № 3. С. 251–264.
- Андреева И.Г. Пороговая длительность сигналов при восприятии человеком радиального движения звуковых образов различного спектрального состава. *Сенсорные системы*. 2004б. Т. 18. № 3. С. 233–238.
- Андреева И.Г., Гвоздева А.П., Огородникова Е.А. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника при моделировании снижения высокочастотного слуха. *Сенсорные системы*. 2018. Т. 32. № 4. С. 277–284. <https://doi.org/10.1134/S0235009218040029>
- Андреева И.Г., Клишова Е.А., Гвоздева А.П., Голованова Л.Е. Метод оценки временных показателей пространственного слуха при сенсоневральной ту-

- гоухости 2–3 степени. *Труды XXXII-й Сессии Российского Акустического Общества*. М.: ГЕОС. 2019. с. 840–845.
- Андреева И.Г., Ситдигов В.М., Гвоздева А.П., Огородникова Е.А., Голованова Л.Е., Клишова Е.А. *Способ скрининговой оценки способности человека к различению положения источников звука по расстоянию*. Патент РФ. № 2754342. 2021.
- Андреева И.Г., Ситдигов В.М., Огородникова Е.А. Экспериментальные подходы к изучению локализации источников звука по расстоянию. *Сенсорные системы*. 2023. Т. 37. № 3. С. 183–204. <https://doi.org/10.31857/S0235009223030022>
- Бабияк В.И., Накатис Я.А. *Клиническая оториноларингология: Руководство для врачей*. СПб.: Гиппократ. 2005. 800 с.
- Бобошко М.Ю., Гарбарук Е.С., Жилинская Е.В., Саллахбеков М.А. Центральные слуховые расстройства (обзор литературы). *Российская оториноларингология*. 2014. № 5. С. 87.
- Вартанян И.А. *Слуховой анализ сложных звуков*. Л: Наука. 1978. 151 с.
- Гвоздева А.П., Андреева И.Г. Метод оценки временных показателей пространственного слуха при сенсоневральной тугоухости 2–3 степени. *Мат. XXXII Сессии Российского Акустического Общества*. М., 2019. С. 113.
- Гвоздева А.П., Клишова Е.А., Голованова Л.Е., Андреева И.Г. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника в норме и при сенсоневральной тугоухости 2–3-й степени. *Российская оториноларингология*. 2020а. Т. 19. № 1. С. 19–24. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24>
- Гвоздева А.П., Ситдигов В.М., Андреева И.Г. Скрининговый метод оценки пространственной и временной разрешающей способности слуха при локализации движения по азимутальной координате. *Рос. физиол. журн.* 2020б. Т. 106. № 9. С. 1170–1188. <https://doi.org/10.31857/S0869813920090113>
- Голованова Л.Е., Бобошко М.Ю., Квасов Е.А., Лаптева Е.С. Тугоухость у взрослого населения старших возрастных групп. *Успехи геронтологии*. 2019. Т. 32. № 1–2. С. 166–173. Режим доступа: [http://www.ger-society.ru/netcat\\_files/userfiles/10/AG\\_2019-32-01-02.pdf](http://www.ger-society.ru/netcat_files/userfiles/10/AG_2019-32-01-02.pdf).
- Клишова Е.А., Гвоздева А.П., Голованова Л.Е., Андреева И.Г. Временные характеристики локализации источника звука, движущегося по азимуту, у пациентов с легкой и умеренной сенсоневральной тугоухостью. *Рос. физиол. журн.* 2021. Т. 107. № 12. С. 1568–1582. <https://doi.org/10.31857/S0869813921120049>
- Королева И.В. *Основы аудиологии и слухопротезирования*. СПб: КАРО, 2022. 448 с.
- Королева И.В., Огородникова Е.А., Пак С.П., Левин С.В., Баякова А.А., Шапорова А.В. Методические подходы к оценке динамики развития процессов слухоречевого восприятия у детей с кохлеарными имплантами. *Российская оториноларингология*. 2013. № 3. С. 75–85.
- Королева И.В., Огородникова Е.А., Левин С.В., Пак С.П., Кузовков В.Е., Янов Ю.К. Использование психоакустических тестов для перцептивной оценки на-  
стройке процессора кохлеарного импланта у глухих пациентов. *Вестник оториноларингологии*. 2021. Т. 86. № 1. С. 30–35. <https://doi.org/10.17116/otorino20218601130>
- Кунельская Н.Л., Левина Ю.В., Гаров Е.В., Дзюина А.В. Пресбиакузис – актуальная проблема стареющего населения. *Вестник оториноларингологии*. 2019. Т. 84. № 4. С. 67–71. <https://doi.org/10.17116/otorino20198404167>
- Огородникова Е.А., Королева И.В., Пак С.П. Восприятие пространственных характеристик звуковых сигналов пациентами после односторонней кохлеарной имплантации. *Вестник психофизиологии*. 2020. № 3. С. 195–199.
- Огородникова Е.А., Королева И.В., Пак С.П. *Способ реабилитации функции акустической ориентации и ее оценки у пациентов с кохлеарным имплантом*. Патент РФ. № 2265426. 2005.
- Огородникова Е.А., Пак С.П. Различение человеком скорости движения при фронтальном приближении источника звука. *Физиология человека*. 1998. Т. 24. № 2. С. 51–55.
- Пак С.П., Огородникова Е.А. Формирование акустических стимулов, моделирующих движение источника звука при его приближении и удалении. *Сенсорные системы*. 1997. Т. 11. № 3. С. 346–351.
- Паренко М.К., Антипенко Е.А., Кузнецова И.А., Щербаков В.И. Восприятие дихотически предъявляемых звуковых шелчков при дисциркуляторной энцефалопатии. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 3. С. 208–218.
- Пресс-релиз ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения). 2021. <https://www.who.int/ru/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050> (дата доступа 9.03.2023).
- Ситдигов В.М., Гвоздева А.П., Андреева И.Г. Дифференциальные пороги слуха при локализации движущихся и неподвижных источников звука для расстояний, типичных при коммуникации. *Труды Всероссийской акустической конференции*. СПб. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. С. 336–339.
- Adel Ghahraman M., Ashrafi M., Mohammadkhani G., Jalaie S. Effects of aging on spatial hearing. *Aging clinical and experimental research*. 2020. V. 32 (4). P. 733–739. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01233-3>
- Aggius-Vella E., Gori M., Campus C., Moore B.C.J., Pardhan S., Kolarik A.J., Van der Stoep N. Auditory distance perception in front and rear space. *Hearing Research*. 2022. V. 417. P. 108468. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2022>
- Ahveninen J., Kopčo N., Jääskeläinen I.P. Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans. *Hearing research*. 2014. V. 307. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.07.008>
- Akeroyd M.A. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014. V. 18. P. 2331216514560442. <https://doi.org/10.1177/2331216514560442>
- Akeroyd M.A. The effect of hearing-aid compression on judgments of relative distance. *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 127 (1). P. 9–12. <https://doi.org/10.1121/1.3268505>

- Akeroyd M.A., Gatehouse S., Blaschke J. The detection of differences in the cues to distance by elderly hearing-impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 121 (2). P. 1077–1089.  
<https://doi.org/10.1121/1.2404927>
- Altman J.A., Andreeva I.G. Monaural perception and binaural perception of approaching and withdrawing auditory images in humans. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43 (4). P. 227–235.  
<https://doi.org/10.1080/14992020400050031>
- Altman Y.A., Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Subjective acoustic field of patients with cortical temporal lobe epilepsy as revealed using signals simulating various directions of sound movement. *Human Physiology*. 2004. V. 30. P. 152–158.  
<https://doi.org/10.1023/B:HUMP.0000021642.52947.a2>
- Altmann C.F., Ono K., Callan A., Matsuhashi M., Mima T., Fukuyama H. Environmental reverberation affects processing of sound intensity in right temporal cortex. *European Journal of Neuroscience*. 2013. V. 38 (8). P. 3210–3220.
- Altman J., Rosenblum A., Lvova V. Lateralization of a moving auditory image in patients with focal damage of the brain hemispheres. *J. Neuropsychol.* 1987. V. 25 (2). P. 435.
- Amann E., Anderson I. Development and validation of a questionnaire for hearing implant users to self-assess their auditory abilities in everyday communication situations: the Hearing Implant Sound Quality Index (HISQUI19). *Acta Oto-Laryngologica*. 2014. V. 134 (9). P. 915–923.  
<https://doi.org/10.3109/00016489.2014.909604>
- Andreeva I.G. Spatial selectivity of hearing in speech recognition in speech-shaped noise environment. *Hum Physiol.* 2018. V. 44 (2). P. 226–236.  
<https://doi.org/10.1134/S0362119718020020>
- Andreeva I.G., Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Ogorodnikova E.A. Comparative assessment of spatial and temporal resolutions in the localization of an approaching and receding broadband noise source in healthy subjects and patients with first-degree symmetric sensorineural hearing loss. *Human Physiology*. 2020. V. 46 (5). P. 465–472.  
<https://doi.org/10.1134/S0362119720040039>
- Andreeva I.G., Orlov V.A., Ushakov V.L. Activation of multimodal areas in the human cerebral cortex in response to biological motion sounds. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2018. V. 54. P. 363–373.
- Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling the effects of sensorineural hearing loss on sound localization in the median plane. *Trends Hear.* 2016. V. 20. Special issue. P. 1.  
<https://doi.org/10.1177/2331216516662003>
- Boyd A.W., Whitmer W.M., Soraghan J.J., Akeroyd M.A. Auditory externalization in hearing-impaired listeners: The effect of pinna cues and number of talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. V. 131 (3). P. 268.  
<https://doi.org/10.1121/1.3687015>
- Boccia M., Nemmi F., Guariglia C. Neuropsychology of environmental navigation in humans: review and meta-analysis of fMRI studies in healthy participants. *Neuropsychol. Rev.* 2014. V. 24 (2). P. 236–251.
- Brimjoin W.O., Akeroyd M.A. The moving minimum audible angle is smaller during self motion than during source motion. *Frontiers in Neuroscience*. 2014. V. 8. P. 273.  
<https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00273>
- Bronkhorst A.W. The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception & Psychophysics*. 2015. V. 77 (5). P. 1465–1487.  
<https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Burkhard M. Non hearing-aid uses of the KEMAR manikin. *Manikin Measurements*. Industrial Research Products Inc. 1978. P. 63–65.
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in hearing*. 2016. V. 20. P. 2331216516644254.  
<https://doi.org/10.1177/2331216516644254>
- Chandler D.W., Grantham D.W. Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91 (3). P. 1624–1636.  
<https://doi.org/10.1121/1.402443>
- Coudert A., Gaveau V., Gatel J., Verdelet G., Saleme R., Farne A., Pavani F., Truy E. Spatial hearing difficulties in reaching space in bilateral cochlear implant children improve with head movements. *Ear & Hearing*. 2021. V. 43 (1). P. 192–205.  
<https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001090>
- Coudert A., Verdelet G., Reilly K.T., Truy E., Gaveau V. Intensive training of spatial hearing promotes auditory abilities of bilateral cochlear implant adults: a pilot study. *Ear and Hearing*. 2022.  
<https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001256>
- Courtois G., Grimaldi V., Lissek H., Estoppey P., Georganti E. Perception of auditory distance in normal-hearing and moderate-to-profound hearing-impaired listeners. *Trends in Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–18.  
<https://doi.org/10.1177/2331216519887615>
- Ernst A., Anton K., Brendel M., Battmer R-D. Benefit of directional microphones for unilateral, bilateral and bimodal cochlear implant users. *Cochlear Implants International*. 2019. V. 20 (9). P. 1–11.  
<https://doi.org/10.1080/14670100.2019.1578911>
- Fischer N., Weber B., Riechelmann H. Presbycusis – age related hearing loss. *Laryngorhinootologie*. 2016. V. 95. № (7). P. 497–510.  
<https://doi.org/10.1055/s-0042-106918>
- Fluitt K.F., Mermagen T., Letowski T. Auditory perception in open field: Distance estimation. *Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Human Research and Engineering Directorate*. 2013.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1182.7602>
- Gatehouse S., Noble W. “Speech, Spatial, and Qualities of Hearing” questionnaire. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43 (2). P. 85–99.  
<https://doi.org/10.1080/14992020400050014>
- Ghazanfar A.A., Neuhoff J.G., Logothetis N.K. Auditory looming perception in rhesus monkeys. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2002. V. 99. P. 15755–15757.
- Glyde H., Hickson L., Cameron S., Dillon H. Problems hearing in noise in older adults: a review of spatial processing disorder. *Trends in amplification*. 2011. V. 15 (3). P. 116–126.  
<https://doi.org/10.1177/1084713811424885>
- Graziano M.S., Reiss L.A., Gross C.G. A neuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature*. 1999. V. 397. P. 428–430.

- Griffiths T.D., Warren J.D. The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences*. 2002. V. 25. P. 348–353.
- Guipponi O., Wardak C., Ibarrola D., Comte J.C., Sappey-Marinièr D., Pine`de S., Ben Hamed S. Multimodal convergence within the intraparietal sulcus of the macaque monkey. *J Neurosci*. 2013. V. 33. P. 4128–4139.
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. The Minimum Audible Movement Distance for Localization of Approaching and Receding Broadband Noise with a Reduced Fraction of High-Frequency Spectral Components Typical of Prebycusis. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2019. V. 55 (6). P. 463–474. <https://doi.org/10.1134/S0022093019060048>
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Golovanova L.E., Andreeva I.G. The influence of previous myocardial infarctions on the temporal threshold for sound source motion localization in patients with sensorineural hearing loss. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2020. V. 56 (7). P. 763–773.
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Andreeva I.G. Minimal time to determine direction of azimuthally moving sounds in moderately severe sensorineural hearing loss. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2021. V. 43 (1). P. 050003.
- Hall D.A., Moore D.R. Auditory neuroscience: The salience of looming sounds. *Current Biology*. 2003. V. 13 (3). R91–R93. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00034-4)
- Jones H.G., Koka K., Tollin D.J. The sound source distance dependence of the acoustical cues to location and their encoding by neurons in the inferior colliculus: implications for the duplex theory. In: *Basic aspects of hearing* (Moore BCJ, ed). New York: Springer. 2013. P. 273–282.
- Keating P., King A.J. Developmental plasticity of spatial hearing following asymmetric hearing loss: context-dependent cue integration and its clinical implications. *Frontiers in systems neuroscience*. 2013. V. 7 (123). <https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00123>
- Kim D.O., Zahorik P., Carney L.H., Bishop B.B., Kuwada S. Auditory distance coding in rabbit midbrain neurons and human perception: monaural amplitude modulation depth as a cue. *Journal of Neuroscience*. 2015. V. 35 (13). P. 5360–5372.
- Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E., Andreeva I.G. Temporal characteristics of azimuthally moving sound source localization in patients with mild and moderate sensorineural hearing loss. *J. Evol. Biochem. Phys.* 2021. V. 57. P. 1499–1510. <https://doi.org/10.1134/S0022093021060260>
- Kolarik A.J., Moore B.C.J., Zahorik P., Cirstea S., Pardhan S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys.* 2016. V. 78 (2). P. 373–395. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1>
- Kopčo N., Doreswamy K.K., Huang S., Rossi S., Ahveninen J. Cortical auditory distance representation based on direct-to-reverberant energy ratio. *NeuroImage*. 2020. V. 208. P. 116436.
- Kopčo N., Huang S., Belliveau J.W., Raji T., Tengshe C., Ahveninen J. Neuronal representations of distance in human auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. V. 109 (27). P. 11019–11024.
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. In: *Neural Networks and Neurotechnologies* (edc: Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova). SPb, Publish by VVM. 2019. P. 231–249.
- Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Comparative characteristics of spatial hearing of patients with different forms of cortical epilepsy. *Human Physiology*. 2000. V. 26. P. 148–153. <https://doi.org/10.1007/BF02760085>
- Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. The subjective auditory space of epileptic patients with lesions in both the temporal cortical area and the hippocampus. *Hum Physiol*. 2007. V. 33. P. 539–545. <https://doi.org/10.1134/S0362119707050040>
- Kumpik D.P., King A.J. A review of the effects of unilateral hearing loss on spatial hearing. *Hear Res*. 2019. V. 372. P. 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.08.003>
- Lohse M., Zimmer-Harwood P., Dahmen J.C., King A.J. Integration of somatosensory and motor-related information in the auditory system. *Frontiers in Neuroscience*. 2022. V. 16. P. 1010211. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1010211>
- Ludwig A.A., Meuret S., Battmer R-D., Schönwiesner M., Fuchs M., Ernst A. Sound localization in single-sided deaf participants provided with a cochlear implant. *Front. Psychol*. 2021. V. 12. P. 753339. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.753339>
- Lundbeck M., Grimm G., Hohmann V., Laugesen S., Nehler T. Sensitivity to angular and radial source movements as a function of acoustic complexity in normal and impaired hearing. *Trends in hearing*. 2017. V. 21. P. 2331216517717152. <https://doi.org/10.1177/2331216517717152>
- Makous J.C., Middlebrooks J.C. Two-dimensional sound localization by human listeners. *The journal of the Acoustical Society of America*. 1990. V. 87 (5). P. 2188–2200. <https://doi.org/10.1121/1.399186>
- Mathiak K., Hertrich I., Kincses W.E., Riecker A., Lutzenberger W., Ackermann H. The right supratemporal plane hears the distance of objects: neuromagnetic correlates of virtual reality. *Neuroreport*. 2003. V. 14. № (3). P. 307–311.
- Middlebrooks J.C. Sound localization. *Handbook of clinical neurology*. 2015. V. 129. P. 99–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00006-8>
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Moore B.C.J. *Cochlear hearing loss: Physiological, psychological, and technical issues* (2nd ed.). Wiley. 2007. 332 p.
- Moore D.R., King A.J. Auditory perception: the near and far of sound localization. *Current Biology*. 1999. V. 9 (10). P. R361–R363. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(99\)80227-9](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(99)80227-9)
- Moulin A., Richard C. Sources of variability of Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ) scores in normal-hearing and hearing-impaired populations. *Int J Audiol*. 2016. V. 55 (2). P. 101–109. <https://doi.org/10.3109/14992027.2015.1104734>
- Musa-Shufani S., Walger M., von Wedel H., Meister H. Influence of dynamic compression on directional hearing in the horizontal plane. *Ear and hearing*. 2006. V. 27

- (3). P. 279–285.  
<https://doi.org/10.1097/01.aud.0000215972.68797.5e>
- Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.
- Muthu A.N.P., Fathima H., Kanagokar V., Bhat J.S., Kumar S. A system for spatial hearing research. *MethodsX*. 2022. V. 9. P. 101727.  
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101727>
- Nisha K.V., Uppunda A.K., Kumar R.T. Spatial rehabilitation using virtual auditory space training paradigm in individuals with sensorineural hearing impairment. *Front. Neurosci.* 2023. V. 16. P. 1080398.  
<https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1080398>
- Noble W., Byrne D., Lepage B. Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1994. V. 9 (2). P. 992–1005.  
<https://doi.org/10.1121/1.408404>
- Nopp P., Schleich P., D'haese P. Sound localization in bilateral users of MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implants. *Ear and hearing*. 2004. V. 25 (3). P. 205–214.  
<https://doi.org/10.1097/01.AUD.0000130793.20444.50>
- Otte R.J., Agterberg M.J.H., Wanrooij M.M.V., Snik A.F.M., Van Opstal A.J. Age-related hearing loss and ear morphology affect vertical but not horizontal sound-localization performance. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2013. V. 14 (2). P. 261–273.  
<https://doi.org/10.1007/s10162-012-0367-7>
- Paul S. Binaural recording technology: A historical review and possible future developments. *Acta Acustica united with Acustica*. 2009. V. 95. P. 767–788.  
<https://doi.org/10.3813/AAA.918208>
- Pavani F., Macaluso E., Warren J.D., Driver J., Griffiths T.D. A common cortical substrate activated by horizontal and vertical sound movement in the human brain. *Curr. Biol.* 2002. V. 12 (18). P. 1584–1590.
- Perrott D.R., Costantino B., Cisneros J. Auditory and visual localization performance in a sequential discrimination task. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. V. 93 (4). P. 2134–2138.  
<https://doi.org/10.1121/1.406675>
- Perrott D.R., Musicant A.D. Minimum auditory movement angle: binaural localization of moving sound sources. *Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62 (6). P. 1463–1466.  
<https://doi.org/10.1121/1.381675>
- Peters B.R., Wyss J., Manrique M. Worldwide trends in bilateral cochlear implantation. *Laryngoscope*. 2010. V. 120 (2). P. 17–44.  
<https://doi.org/10.1002/lary.20859>
- Pienkowski M., Tyler R.S., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozowski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A Review of Hyperacusis and Future Directions: Part II. Measurement, Mechanisms, and Treatment. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 420.  
[https://doi.org/10.1044/2014\\_AJA-13-0037](https://doi.org/10.1044/2014_AJA-13-0037)
- Rauschecker J.P. Auditory and visual cortex of primates: A comparison of two sensory systems. *Eur J Neurosci*. 2015. V. 41. P. 579–585.
- Reiss D., Zanetti M., Neukum G. Multitemporal observations of identical active dust devils on Mars with the High Resolution Stereo Camera (HRSC) and Mars Orbiter Camera (MOC). *Icarus*. 2011. V. 215 (1). P. 358–369.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.011>
- Ricketts T.A., Grantham D.W., Ashmead D.H., Haynes D.S., Labadie R.F. Speech recognition for unilateral and bilateral cochlear implant modes in the presence of uncorrelated noise sources. *Ear and hearing*. 2006. V. 27 (6). P. 763–773.  
<https://doi.org/10.1097/01.aud.0000240814.27151.b9>
- Russell M.K. Age and Auditory spatial perception in humans: review of behavioral findings and suggestions for future research. *Front. Psychol.* 2022. V. 13. P. 831670.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.831670>
- Schoen F., Mueller J., Helms J., Nopp P. Sound localization and sensitivity to interaural cues in bilateral users of the Med-El Combi 40/40+ cochlear implant system. *Otology & Neurotology*. 2005. V. 26 (3). P. 429–437.  
<https://doi.org/10.1097/01.mao.0000169772.16045.86>
- Seifritz E., Neuhoff J.G., Bilecen D., Scheffler K., Mustovic H. Neural processing of auditory looming in the human brain. *Current Biology*. 2002. V. 12. P. 2147–2151.  
[https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(02\)01356-8](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(02)01356-8)
- Sharma R.K., Lalwani A.K., Golub J.S. Prevalence and severity of hearing loss in the older old population. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*. 2020. V. 146(8). P. 762–763.  
<https://doi.org/10.1001/jamaoto.2020.0900>
- Simon H.J., Levitt H. Effect of dual sensory loss on auditory localization: implications for intervention. *Trends in Amplification*. 2007. V. 11 (4). P. 259–272.  
<https://doi.org/10.1177/1084713807308209>
- Tyler R.S., Perreau A.E., Ji H. The validation of the spatial hearing questionnaire. *Ear and hearing*. 2009. V. 30 (4). P. 466–474.  
<https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61efe>
- Tyler R.S., Pienkowski M., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozowski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 402.  
[https://doi.org/10.1044/2014\\_AJA-14-0010](https://doi.org/10.1044/2014_AJA-14-0010)
- Vartanyan I.A., Tarkhan A.U., Chernigovskaya T.V. Participation of the left and right hemispheres of the human brain in the formation of a subjective acoustic field. *Fiziol. Chel.* 1999. V. 25 (1). P. 43.
- Zahorik P., Brungart D.S., Bronkhorst A.W. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica*. 2005. V. 91 (3). P. 409–420.
- Zheng Y., Koehnke J., Besing J. Combined effects of noise and reverberation on sound localization for listeners with normal hearing and bilateral cochlear implants. *American Journal of Audiology*. 2017. V. 26 (4). P. 519–530.  
[https://doi.org/10.1044/2017\\_AJA-16-0101](https://doi.org/10.1044/2017_AJA-16-0101)
- Zheng Y., Swanson J., Koehnke J., Guan J. Sound localization of listeners with normal hearing, impaired hearing, hearing aids, bone-anchored hearing instruments, and cochlear implants: a review. *American Journal of Audiology (AJA)*. 2022. V. 31 (3). P. 819–834.  
[https://doi.org/10.1044/2022\\_AJA-22-00006](https://doi.org/10.1044/2022_AJA-22-00006)

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

E. A. Ogorodnikova<sup>a,\*</sup>, E. A. Klishova<sup>b</sup>, and I. G. Andreeva<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences,  
199034, Makarov emb., 6, St. Petersburg, Russia

<sup>b</sup> Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences,  
194223, pr. M. Torez, 44, St. Petersburg, Russia

\*E-mail: ogorodnikovaea@infran.ru

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

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

### REFERENCES

- Altman J.A. *Prostranstvennyj sluh* [Spatial hearing]. SPb: Institut fiziologii im. I.P. Pavlova RAN [Pavlov Institute of Physiology RAS]. 2011. 311 p. (in Russian).
- Altman J.A., Andreeva I.G. *Vospriyatie priblizheniya i udaleniya zvukovogo obraza pod raznymi azimutal'nymi uglami pri monaural'nom proslushivanii*. [Perception of approach and withdrawing of a sound image at different azimuthal angles during monaural listening] *Sensory systems*. 2000. V. 14 (1). P. 11–17 (in Russian).
- Altman J.A., Tavartkiladze G.A. *Rukovodstvo po audiologii*. [Handbook on audiology]. M.: DMK Press, 2003. P. 360 (in Russian).
- Andreeva I.G. *Virtual'naya akusticheskaya real'nost': psikoakusticheskie issledovaniya*. [Virtual Acoustic Reality: Psychoacoustic Research] *Sensory systems*. 2004a. V. 18 (3). P. 251–264 (in Russian).
- Andreeva I.G. *Porogovaya dlitel'nost' signalov pri vospriyatii chelovekom radial'nogo dvizheniya zvukovykh obrazov razlichnogo spektral'nogo sostava*. [Threshold duration of signals during human perception of radial motion of sound images of different spectral composition] *Sensory systems*. 2004b. V. 18 (3). P. 233–238 (in Russian).
- Andreeva I.G., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A. *Porogovaya dlitel'nost' zvukovykh signalov dlya otsenki priblizheniya i udaleniya ikh istochnika pri modelirovanii snizheniya vysokochastotnogo slukha*. [Threshold duration of sound signals for their sources approaching and withdrawing under condition of high-frequency hearing loss modeling] *Sensory systems*. 2018. V. 32 (4). P. 277–284. <https://doi.org/10.1134/S0235009218040029> (in Russian).
- Andreeva I.G., Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E. *Metod otsenki vremennykh pokazatelei prostranstvennogo slukha pri sensonevral'noi tugoukhosti 2-3 stepeni*. [A method for assessing temporal indicators of spatial hearing in sensorineural hearing loss of 2–3 degrees] *Trudy XXXII-i Sessii Rossiiskogo Akusticheskogo Obshchestva* [Proceedings of the XXXII-th Session of the Russian Acoustic Society]. M.: GEOS. 2019. P. 840–845 (in Russian).
- Andreeva I.G., Sitdikov V.M., Gvozdeva A.P., Ogorodnikova E.A., Golovanova L.E., Klishova E.A. *Sposob skringovoi otsenki sposobnosti cheloveka k razlicheniyu polozheniya istochnikov zvuka po rasstoyaniyu*. [A method for screening assessment of a human's ability to distinguish between the position of sound sources by distance] Patent RF. № 2754342. 2021. (in Russian).
- Andreeva I.G., Sitdikov V.M., Ogorodnikova E.A. *Ekspierimental'nyye podkhody k izucheniyu lokalizatsii istochnikov zvuka po rasstoyaniyu*. [Experimental methods to study the sound source localization by distance in humans]. *Sensory systems*. 2023. V. 37 (3). P. 183–204. <https://doi.org/10.31857/S0235009223030022> (in Russian).
- Babiyak V.I., Nakatis J.A. *Klinicheskaya otorinolaringologiya: Rukovodstvo dlya vrachei*. [Clinical otorhinolaryngology: A guide for physicians.] SPb: Gippokrat. 2005. 800 p. (in Russian).
- Boboshko M.J., Garbaruk E.S., Zhilinskaya E.V., Salakhbekov M.A. *Tsentral'nye slukhovye rasstroistva (obzor literatury)*. [Central auditory processing disorders (literature review)] *Russian otorhinolaryngology*. 2014. V. 5. P. 87 (in Russian).
- Vartanyan I.A. *Slukhovoii analiz slozhnykh zvukov*. [Auditory analysis of complex sounds.] Leningrad: Nauka [The science]. 1978. 151 p. (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. *Metod otsenki vremennykh pokazatelei prostranstvennogo slukha pri sensonevral'noi tugoukhosti 2–3 stepeni*. [Method for assessing temporal indicators of spatial hearing in sensorineural hearing loss of 2–3 degrees] *Materialy XXXII Sessii Rossiiskogo Akusticheskogo Obshchestva*. [Materials of the

- XXXII Session of the Russian Acoustic Society.] М., 2019. P. 113 (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Golovanova L.E., Andreeva I.G. *Porogovaya dlitel'nost' zvukovykh signalov dlya otsenki priblizheniya i udaleniya ikh istochnika v norme i pri sensonevral'noy tugoukhosti 2-3-y stepeni* [Threshold duration of audio signals for assessment of approaching and receding of their source in normal condition and in 2nd and 3rd degree sensorineural hearing loss]. *Russian Otorhinolaryngology*. 2020a. V. 19 (1). P. 19–24. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24> (in Russian).
- Gvozdeva A.P., Sitdikov V.M., Andreeva I.G. *Skriningovyi metod otsenki prostranstvennoi i vremennoi razreshayushchei sposobnosti slukha pri lokalizatsii dvizheniya po azimutal'noi koordinate*. [Screening method for assessing the spatial and temporal resolution of hearing in the localization of movement along the azimuthal coordinate] *Russian Journal of Physiology*. 2020b. V. 106 (9). P. 1170–1188. <https://doi.org/10.31857/S0869813920090113> (in Russian).
- Golovanova L.E., Boboshko M.J., Kvasov E.A., Lapteva E.S. *Tugoukhost' u vzroslogo naseleniya starshikh vozrastnykh grupp*. [Hearing loss in the adult population of older age groups]. *Uspekhi gerontologii* [Advances in gerontology]. 2019. V. 32 (1–2). P. 166–173. Режим доступа: [http://www.gersociety.ru/netcat\\_files/user-files/10/AG\\_2019-32-01-02.pdf](http://www.gersociety.ru/netcat_files/user-files/10/AG_2019-32-01-02.pdf) (in Russian).
- Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E., Andreeva I.G. *Vremennye kharakteristiki lokalizatsii istochnika zvuka, dvizhushchegosya po azimutu, u patsientov s legkoi i umerennoi sensonevral'noi tugoukhost'yu*. [Temporal Characteristics of Azimuthally Moving Sound Source Localization in Patients with Mild and Moderate Sensorineural Hearing Loss.] *Russian Journal of Physiology*. 2021. V. 107 (12). P. 1568–1582. <https://doi.org/10.31857/S0869813921120049> (in Russian).
- Koroleva I.V. *Osnovy audiologii i slukhoprotezirovaniya*. [Fundamentals of audiology and hearing aid]. SPb.: KARO, 2022. 448 p. (in Russian).
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A., Pak S.P., Levin S.V., Baliakova A.A., Shaporova A.V. *Metodicheskiye podkhody k otsenke dinamiki razvitiya protsessov slukhorechevogo vospriyatiya u detey s kokhlearnymi implantami*. [Methodological approaches to assessing the dynamics of the development of hearing and speech perception processes in children with cochlear implants] *Russian Otorhinolaryngology*. 2013. N 3. P. 75–85. (in Russian).
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A., Levin S.V., Pak S.P., Kusovkov V.E., Yanov J.K. *Ispol'zovaniye psikoakusticheskikh testov dlya pertseptivnoy otsenki nastroyki protsessora kokhlearnogo implanta u glukhikh patsiyentov* [Using of psychoacoustic tests for perceptual assessment of processor fitting in patients with cochlear implants] *Vestnik Oto-Rino-Laringologii* [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 2021. V. 86 (1). P. 30–35. <https://doi.org/10.17116/otorino20218601130> (in Russian).
- Kunel'skaya N.L., Levina Iu.V., Garov E.V., Dzuina A.V., Ogorodnikov D.S., Nosulia E.V., Luchsheva Yu.V. *Presbiakuzis – aktual'naya problema stareyushchego naseleniya* [Presbycusis is the actual problem of the aging population] *Vestnik Oto-Rino-Laringologii* [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 2019. V. 84 (4). P. 67–71. <https://doi.org/10.17116/otorino20198404167> (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Koroleva I.V., Pak S.P. *Vospriyatiye prostranstvennykh kharakteristik zvukovykh signalov patsiyentami posle odносторонney kokhlearnoy implantatsii* [Perception of spatial characteristics of sound signals by patients after unilateral cochlear implantation] *Psychophysiology news*. 2020. V. 3. P. 195–199 (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Koroleva I.V., Pak S.P. *Sposob reabilitatsii funktsii akusticheskoi orientatsii i ee otsenki u patsiyentov s kokhlearnym implantom*. [Method for Rehabilitation of Acoustic Orientation Function and Its Assessment in Patients with Cochlear Implant.] Patent RF. № 2265426. 2005 (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Pak S.P. *Razlichenie chelovekom skorosti dvizheniya pri frontal'nom priblizhenii istochnika zvuka*. [Distinguishing by a person the speed of movement when the sound source is approached frontally.] *Human physiology*. 1998. V. 24 (2). P. 51–55 (in Russian).
- Pak S.P., Ogorodnikova E.A. *Formirovanie akusticheskikh stimulov, modeliruyushchikh dvizhenie istochnika zvuka pri ego priblizhenii i udaleni*. [Formation of acoustic stimuli that simulate the movement of a sound source as it approaches and moves away.] *Sensory systems*. 1997. V. 11 (3). P. 346–351 (in Russian).
- Parento M.K., Antipenko E.A., Kuznetsova I.A., Shcherbakov V.I. *Vospriyatie dikhoticheski pred'yavlyaemykh zvukovykh shchelchok pri distsirkulyatornoi entsefalopatii*. [Perception of dichotically presented sound clicks in dyscirculatory encephalopathy.] *Sensory systems*. 2009. V. 23 (3). P. 208–218 (in Russian).
- Press release of WHO (World Health Organization.). 2021. <https://www.who.int/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050> (access date 9.03.2023).
- Sitdikov V.M., Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. *Differentsial'nye porogi slukha pri lokalizatsii dvizhushchikhysya i nepodvizhnykh istochnikov zvuka dlya rasstoyanii, tipichnykh pri kommunikatsii*. [Differential hearing thresholds for the localization of moving and stationary sound sources for distances typical in communication.] *Trudy Vserossiiskoi akusticheskoi konferentsii* [Proceedings of the All-Russian Acoustic Conference]. SPb. POLITEKh-PRESS. 2020. P. 336–339. (in Russian).
- Adel Ghahraman M., Ashrafi M., Mohammadkhani G., Jalaie S. Effects of aging on spatial hearing. *Aging clinical and experimental research*. 2020. V. 32 (4). P. 733–739. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01233-3>
- Aggius-Vella E., Gori M., Campus C., Moore B.C.J., Pardhan S., Kolarik A.J., Van der Stoep N. Auditory distance perception in front and rear space. *Hearing Research*. 2022. V. 417: 108468. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2022>
- Ahveninen J., Kopčo N., Jääskeläinen I.P. Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans. *Hearing research*. 2014. V. 307. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.07.008>
- Akeroyd M.A. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. *Trends in Hearing*. 2014. V. 18: 2331216514560442. <https://doi.org/10.1177/2331216514560442>

- Akeroyd M.A. The effect of hearing-aid compression on judgments of relative distance. *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 127 (1). P. 9–12. <https://doi.org/10.1121/1.3268505>
- Akeroyd M.A., Gatehouse S., Blaschke J. The detection of differences in the cues to distance by elderly hearing-impaired listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 121 (2). P. 1077–1089. <https://doi.org/10.1121/1.2404927>
- Altman J.A., Andreeva I.G. Monaural perception and binaural perception of approaching and withdrawing auditory images in humans. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43 (4). P. 227–235. <https://doi.org/10.1080/14992020400050031>
- Altman Y.A., Kotelenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Subjective acoustic field of patients with cortical temporal lobe epilepsy as revealed using signals simulating various directions of sound movement. *Human Physiology*. 2004. V. 30. P. 152–158. <https://doi.org/10.1023/B:HUMP.0000021642.52947.a2>
- Altmann C.F., Ono K., Callan A., Matsushashi M., Mima T., Fukuyama H. Environmental reverberation affects processing of sound intensity in right temporal cortex. *European Journal of Neuroscience*. 2013. V. 38 (8). P. 3210–3220.
- Altman J., Rosenblum A., Lvova V. Lateralization of a moving auditory image in patients with focal damage of the brain hemispheres. *J. Neuropsychol.* 1987. V. 25 (2). P. 435.
- Amann E., Anderson I. Development and validation of a questionnaire for hearing implant users to self-assess their auditory abilities in everyday communication situations: the Hearing Implant Sound Quality Index (HISQUI19). *Acta Oto-Laryngologica*. 2014. V. 134 (9). P. 915–923. <https://doi.org/10.3109/00016489.2014.909604>
- Andreeva I.G. Spatial selectivity of hearing in speech recognition in speech-shaped noise environment. *Hum Physiol.* 2018. V. 44 (2). P. 226–236. <https://doi.org/10.1134/S0362119718020020>
- Andreeva I.G., Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Ogorodnikova E.A. Comparative assessment of spatial and temporal resolutions in the localization of an approaching and receding broadband noise source in healthy subjects and patients with first-degree symmetric sensorineural hearing loss. *Human Physiology*. 2020. V. 46 (5). P. 465–472. <https://doi.org/10.1134/S0362119720040039>
- Andreeva I.G., Orlov V.A., Ushakov V.L. Activation of multimodal areas in the human cerebral cortex in response to biological motion sounds. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2018. V. 54. P. 363–373.
- Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling the effects of sensorineural hearing loss on sound localization in the median plane. *Trends Hear.* 2016. V. 20. Special issue. P. 1. <https://doi.org/10.1177/2331216516662003>
- Boyd A.W., Whitmer W.M., Soraghan J.J., Akeroyd M.A. Auditory externalization in hearing-impaired listeners: The effect of pinna cues and number of talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. V. 131 (3). P. 268. <https://doi.org/10.1121/1.3687015>
- Boccia M., Nemmi F., Guariglia C. Neuropsychology of environmental navigation in humans: review and meta-analysis of fMRI studies in healthy participants. *Neuropsychol. Rev.* 2014. V. 24 (2). P. 236–251.
- Brimjoin W.O., Akeroyd M.A. The moving minimum audible angle is smaller during self motion than during source motion. *Frontiers in Neuroscience*. 2014. V. 8. P. 273. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00273>
- Bronkhorst A.W. The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception & Psychophysics*. 2015. V. 77 (5). P. 1465–1487. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Burkhard M. Non hearing-aid uses of the KEMAR manikin. *Manikin Measurements*. Industrial Research Products Inc. 1978. P. 63–65.
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in hearing*. 2016. 20: 2331216516644254. <https://doi.org/10.1177/2331216516644254>
- Chandler D.W., Grantham D.W. Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91 (3). P. 1624–1636. <https://doi.org/10.1121/1.402443>
- Coudert A., Gaveau V., Gatel J., Verdelet G., Salemm R., Farne A., Pavani F., Truy E. Spatial hearing difficulties in reaching space in bilateral cochlear implant children improve with head movements. *Ear & Hearing*. 2021. V. 43 (1). P. 192–205. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001090>
- Coudert A., Verdelet G., Reilly K.T., Truy E., Gaveau V. Intensive training of spatial hearing promotes auditory abilities of bilateral cochlear implant adults: a pilot study. *Ear and Hearing*. 2022. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000001256>
- Courtois G., Grimaldi V., Lissek H., Estoppey P., Georganti E. Perception of auditory distance in normal-hearing and moderate-to-profound hearing-impaired listeners. *Trends in Hearing*. 2019. V. 23. P. 1–18. <https://doi.org/10.1177/2331216519887615>
- Ernst A., Anton K., Brendel M., Battmer R.-D. Benefit of directional microphones for unilateral, bilateral and bimodal cochlear implant users. *Cochlear Implants International*. 2019. V. 20 (9). P. 1–11. <https://doi.org/10.1080/14670100.2019.1578911>
- Fischer N., Weber B., Riechelmann H. Presbycusis – age related hearing loss. *Laryngorhinootologie*. 2016. V. 95. N (7). P. 497–510. <https://doi.org/10.1055/s-0042-106918>
- Fluitt K.F., Mermagen T., Letowski T. Auditory perception in open field: Distance estimation. *Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Human Research and Engineering Directorate*. 2013. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1182.7602>
- Gatehouse S., Noble W. “Speech, Spatial, and Qualities of Hearing” questionnaire. *Int. J. Audiol.* 2004. V. 43 (2). P. 85–99. <https://doi.org/10.1080/14992020400050014>
- Ghazanfar A.A., Neuhoff J.G., Logothetis N.K. Auditory looming perception in rhesus monkeys. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2002. V. 99. P. 15755–15757.
- Glyde H., Hickson L., Cameron S., Dillon H. Problems hearing in noise in older adults: a review of spatial processing disorder. *Trends in amplification*. 2011. V. 15 (3). P. 116–126. <https://doi.org/10.1177/1084713811424885>
- Graziano M.S., Reiss L.A., Gross C.G. A neuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature*. 1999. V. 397. P. 428–430.
- Griffiths T.D., Warren J.D. The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences*. 2002. V. 25. P. 348–353.

- Guipponi O., Wardak C., Ibarrola D., Comte J.C., Sappey-Marinié D., Pine'de S., Ben Hamed S. Multimodal convergence within the intraparietal sulcus of the macaque monkey. *J Neurosci*. 2013. V. 33. P. 4128–4139.
- Gvozdeva A.P., Andreeva I.G. The Minimum Audible Movement Distance for Localization of Approaching and Receding Broadband Noise with a Reduced Fraction of High-Frequency Spectral Components Typical of Prebycusis. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2019. V. 55 (6). P. 463–474. <https://doi.org/10.1134/S0022093019060048>
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Golovanova L.E., Andreeva I.G. The influence of previous myocardial infarctions on the temporal threshold for sound source motion localization in patients with sensorineural hearing loss. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2020. V. 56 (7). P. 763–773.
- Gvozdeva A.P., Klishova E.A., Sitdikov V.M., Golovanova L.E., Andreeva I.G.. Minimal time to determine direction of azimuthally moving sounds in moderately severe sensorineural hearing loss. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2021. V. 43 (1). P. 050003.
- Hall D.A., Moore D.R. Auditory neuroscience: The salience of looming sounds. *Current Biology*. 2003. V. 13 (3). R91–R93. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00034-4)
- Jones H.G., Koka K., Tollin D.J. The sound source distance dependence of the acoustical cues to location and their encoding by neurons in the inferior colliculus: implications for the duplex theory. In: *Basic aspects of hearing* (Moore BCJ, ed). New York: Springer. 2013. P. 273–282.
- Keating P., King A.J. Developmental plasticity of spatial hearing following asymmetric hearing loss: context-dependent cue integration and its clinical implications. *Frontiers in systems neuroscience*. 2013. V. 7 (123). <https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00123>
- Kim D.O., Zahorik P., Carney L.H., Bishop B.B., Kuwada S. Auditory distance coding in rabbit midbrain neurons and human perception: monaural amplitude modulation depth as a cue. *Journal of Neuroscience*. 2015. V. 35 (13). P. 5360–5372.
- Klishova E.A., Gvozdeva A.P., Golovanova L.E., Andreeva I.G. Temporal characteristics of azimuthally moving sound source localization in patients with mild and moderate sensorineural hearing loss. *J. Evol. Biochem. Phys.* 2021. V. 57. P. 1499–1510. <https://doi.org/10.1134/S0022093021060260>
- Kolarik A.J., Moore B.C.J., Zahorik P., Cirstea S., Pardhan S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys.* 2016. V. 78 (2). P. 373–395. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1>
- Kopčo N., Doreswamy K.K., Huang S., Rossi S., Ahveninen J. Cortical auditory distance representation based on direct-to-reverberant energy ratio. *NeuroImage*. 2020. V. 208. P. 116436.
- Kopčo N., Huang S., Belliveau J. W., Raji T., Tengshe C., Ahveninen J. Neuronal representations of distance in human auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. V. 109 (27). P. 11019–11024.
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A. Chapter 30: Modern achievements in cochlear and brainstem auditory implantation. In: *Neural Networks and Neurotechnologies* (edc: Yu. Shelepin, E. Ogorodnikova, N. Solovyev, E. Yakimova). SPb, Publish by VVM. 2019. P. 231–249.
- Kotelchenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. Comparative characteristics of spatial hearing of patients with different forms of cortical epilepsy. *Human Physiology*. 2000. V. 26. P. 148–153. <https://doi.org/10.1007/BF02760085>
- Kotelchenko L.M., Fed'ko L.I., Shustin V.A. The subjective auditory space of epileptic patients with lesions in both the temporal cortical area and the hippocampus. *Hum Physiol*. 2007. V. 33. P. 539–545. <https://doi.org/10.1134/S0362119707050040>
- Kumpik D.P., King A.J. A review of the effects of unilateral hearing loss on spatial hearing. *Hear Res*. 2019. V. 372. P. 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2018.08.003>
- Lohse M., Zimmer-Harwood P., Dahmen J.C., King A.J. Integration of somatosensory and motor-related information in the auditory system. *Frontiers in Neuroscience*. 2022. V. 16. P. 1010211. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1010211>
- Ludwig A.A., Meuret S., Battmer R-D., Schönwiesner M., Fuchs M., Ernst A. Sound localization in single-sided deaf participants provided with a cochlear implant. *Front. Psychol*. 2021. V. 12. P. 753339. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.753339>
- Lundbeck M., Grimm G., Hohmann V., Laugesen S., Nether T. Sensitivity to angular and radial source movements as a function of acoustic complexity in normal and impaired hearing. *Trends in hearing*. 2017. V. 21. P. 2331216517717152. <https://doi.org/10.1177/2331216517717152>
- Makous J.C., Middlebrooks J.C. Two-dimensional sound localization by human listeners. *The journal of the Acoustical Society of America*. 1990. V. 87 (5). P. 2188–2200. <https://doi.org/10.1121/1.399186>
- Mathiak K., Hertrich I., Kincses W.E., Riecker A., Lutzenberger W., Ackermann H. The right supratemporal plane hears the distance of objects: neuromagnetic correlates of virtual reality. *Neuroreport*. 2003. V. 14. N (3). P. 307–311.
- Middlebrooks J.C. Sound localization. *Handbook of clinical neurology*. 2015. V. 129. P. 99–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00006-8>
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Moore B.C.J. *Cochlear hearing loss: Physiological, psychological, and technical issues* (2nd ed.). Wiley. 2007. 332 p.
- Moore D.R., King A.J. Auditory perception: the near and far of sound localization. *Current Biology*. 1999. V. 9(10). P. R361–R363. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(99\)80227-9](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(99)80227-9)
- Moulin A., Richard C. Sources of variability of Speech, Spatial, and Qualities of Hearing Scale (SSQ) scores in normal-hearing and hearing-impaired populations. *Int J Audiol*. 2016. V. 55 (2). P. 101–109. <http://doi.org/10.3109/14992027.2015.1104734>
- Musa-Shufani S., Walger M., von Wedel H., Meister H. Influence of dynamic compression on directional hearing in the horizontal plane. *Ear and hearing*. 2006. V. 27 (3). P. 279–285. <https://doi.org/10.1097/01.aud.0000215972.68797.5e>
- Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.

- Muthu A.N.P., Fathima H., Kanagokar V., Bhat J.S., Kumar S. A system for spatial hearing research. *MethodsX*. 2022. V. 9. P. 101727.  
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101727>
- Nisha K.V., Uppunda A.K., Kumar R.T. Spatial rehabilitation using virtual auditory space training paradigm in individuals with sensorineural hearing impairment. *Front. Neurosci.* 2023. V. 16. P. 1080398.  
<https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1080398>
- Noble W., Byrne D., Lepage B. Effects on sound localization of configuration and type of hearing impairment. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1994. V. 9 (2). P. 992–1005.  
<https://doi.org/10.1121/1.408404>
- Nopp P., Schleich P., D'haese P. Sound localization in bilateral users of MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implants. *Ear and hearing*. 2004. V. 25 (3). P. 205–214.  
<https://doi.org/10.1097/01.AUD.0000130793.20444.50>
- Otte R.J., Agterberg M.J.H., Wanrooij M.M.V., Snik A.F.M., Van Opstal A.J. Age-related hearing loss and ear morphology affect vertical but not horizontal sound-localization performance. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2013. V. 14 (2). P. 261–273.  
<https://doi.org/10.1007/s10162-012-0367-7>
- Paul S. Binaural recording technology: A historical review and possible future developments. *Acta Acustica united with Acustica*. 2009. V. 95. P. 767–788.  
<https://doi.org/10.3813/AAA.918208>
- Pavani F., Macaluso E., Warren J.D., Driver J., Griffiths T.D. A common cortical substrate activated by horizontal and vertical sound movement in the human brain. *Curr. Biol.* 2002. V. 12 (18). P. 1584–1590.
- Perrott D.R., Costantino B., Cisneros J. Auditory and visual localization performance in a sequential discrimination task. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1993. V. 93 (4). P. 2134–2138.  
<https://doi.org/10.1121/1.406675>
- Perrott D.R., Musicant A.D. Minimum auditory movement angle: binaural localization of moving sound sources. *Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62 (6). P. 1463–1466.  
<https://doi.org/10.1121/1.381675>
- Peters B.R., Wyss J., Manrique M. Worldwide trends in bilateral cochlear implantation. *Laryngoscope*. 2010. V. 120 (2). P. 17–44.  
<https://doi.org/10.1002/lary.20859>
- Pienkowski M., Tyler R.S., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozowski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A Review of Hyperacusis and Future Directions: Part II. Measurement, Mechanisms, and Treatment. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 420.  
[https://doi.org/10.1044/2014\\_AJA-13-0037](https://doi.org/10.1044/2014_AJA-13-0037)
- Rauschecker J.P. Auditory and visual cortex of primates: A comparison of two sensory systems. *Eur. J. Neurosci.* 2015. V. 41. P. 579–585.
- Reiss D., Zanetti M., Neukum G. Multitemporal observations of identical active dust devils on Mars with the High Resolution Stereo Camera (HRSC) and Mars Orbiter Camera (MOC). *Icarus*. 2011. V. 215 (1). P. 358–369.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.011>
- Ricketts T.A., Grantham D.W., Ashmead D.H., Haynes D.S., Labadie R.F. Speech recognition for unilateral and bilateral cochlear implant modes in the presence of uncorrelated noise sources. *Ear and hearing*. 2006. V. 27 (6). P. 763–773.  
<https://doi.org/10.1097/01.aud.0000240814.27151.b9>
- Russell M.K. Age and Auditory spatial perception in humans: review of behavioral findings and suggestions for future research. *Front. Psychol.* 2022. V. 13. P. 831670.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.831670>
- Schoen F., Mueller J., Helms J., Nopp P. Sound localization and sensitivity to interaural cues in bilateral users of the Med-El Combi 40/40+ cochlear implant system. *Otology & Neurotology*. 2005. V. 26 (3). P. 429–437.  
<https://doi.org/10.1097/01.mao.0000169772.16045.86>
- Seifritz E., Neuhoff J.G., Bilecen D., Scheffler K., Mustovic H. Neural processing of auditory looming in the human brain. *Current Biology*. 2002. V. 12. P. 2147–2151. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(02\)01356-8](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(02)01356-8)
- Sharma R.K., Lalwani A.K., Golub J.S. Prevalence and severity of hearing loss in the older old population. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2020. V. 146 (8). P. 762–763. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2020.0900>
- Simon H.J., Levitt H. Effect of dual sensory loss on auditory localization: implications for intervention. *Trends in Amplification*. 2007. V. 11 (4). P. 259–272.  
<https://doi.org/10.1177/1084713807308209>
- Tyler R.S., Perreau A.E., Ji H. The validation of the spatial hearing questionnaire. *Ear and hearing*. 2009. 30 (4): 466–474.  
<https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61efe>
- Tyler R.S., Pienkowski M., Roncancio E.R., Hyung Jin Jun, Brozowski T., Dauman N., Coelho C.B., Andersson G., Keiner A.J., Cacace A.T., Martin N., Moore B.C.J. A review of hyperacusis and future directions: Part I. Definitions and manifestations. *Am. J. Audiol.* 2014. V. 23 (4). P. 402.  
[https://doi.org/10.1044/2014\\_AJA-14-0010](https://doi.org/10.1044/2014_AJA-14-0010)
- Vartanyan I.A., Tarkhan A.U., Chernigovskaya T.V. Participation of the left and right hemispheres of the human brain in the formation of a subjective acoustic field. *Fiziol. Chel.* 1999. V. 25 (1). P. 43.
- Zahorik P., Brungart D.S., Bronkhorst A.W. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica*. 2005. V. 91 (3). P. 409–420.
- Zheng Y., Koehnke J., Besing J. Combined effects of noise and reverberation on sound localization for listeners with normal hearing and bilateral cochlear implants. *American Journal of Audiology*. 2017. V. 26 (4). P. 519–530. [https://doi.org/10.1044/2017\\_AJA-16-0101](https://doi.org/10.1044/2017_AJA-16-0101)
- Zheng Y., Swanson J., Koehnke J., Guan J. Sound localization of listeners with normal hearing, impaired hearing, hearing aids, bone-anchored hearing instruments, and cochlear implants: a review. *American Journal of Audiology (AJA)*. 2022. V. 31 (3). P. 819–834.  
[https://doi.org/10.1044/2022\\_AJA-22-00006](https://doi.org/10.1044/2022_AJA-22-00006)

## СЛУХОВОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРИ КОХЛЕАРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

© 2023 г. В. И. Пудов<sup>1,\*</sup>, О. В. Зонтова<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГБУ Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи МЗ РФ  
190013 Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9, Россия

\*E-mail: v\_pudov@mail.ru

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.

После доработки 27.07.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

Кохлеарная имплантация – уникальная разработка в области протезирования сенсорных систем человека. За счет электрического раздражения слухового нерва возникают слуховые ощущения, близкие к естественным. Несмотря на значительный прогресс в разработке кохлеарных имплантов (КИ), качество слухового восприятия при их использовании существенно ограничено. Наибольшие трудности у пользователей КИ возникают в сложных ситуациях коммуникации, таких как восприятие речи в шуме или с несколькими говорящими. Существует множество факторов, как технических, так и физиологических, которые затрудняют разборчивость речи у пользователей КИ. Восприятие речи у пользователей КИ ограничено из-за низкой разрешающей способности по частоте, искажения восприятия высоты и сжатия динамического диапазона. Низкая разрешающая способность по частоте проявляется в снижении разборчивости речи и способности воспринимать музыку. Важным является вопрос о состоянии центральных механизмов слуха, особенно для детей с врожденной глухотой. С возрастом у ребенка снижается пластичность мозга и затрудняются процессы формирования центральных слуховых механизмов, поэтому желательно проводить кохлеарную имплантацию в как можно более раннем возрасте после выявления тугоухости. Изучение особенностей слухового восприятия при электрическом возбуждении слухового нерва позволяет не только предложить инновационные подходы для улучшения слуховых способностей пользователей КИ, но и определить новые направления в изучении слуховой системы человека.

*Ключевые слова:* кохлеарная имплантация, высота звука, громкость, дифференциальный порог по частоте, разборчивость речи

**DOI:** 10.31857/S0235009223040066, **EDN:** CNYEVZ

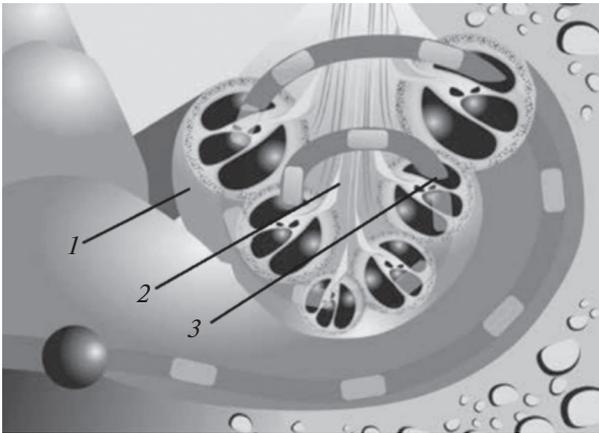
## ВВЕДЕНИЕ

Изучение вопроса слухового восприятия при электрическом возбуждении слухового нерва позволило разработать уникальный способ кохлеарной имплантации (КИ) для протезирования утраченной слуховой функции при помощи многоканального электрода, введенного во внутреннее ухо человека, и электрического раздражения свободных нервных окончаний спирального ганглия внутреннего уха человека (Wilson et al., 1991; Dorman, Wilson, 2004). КИ не только открыла широкие возможности передачи слуховой информации для людей даже с тотальной глухотой, но и определила новые направления в изучении слуховой системы человека (Wilson, Dorman, 2008; Forli et al., 2021; Chen et al., 2022).

Слуховая система человека является уникальной как с точки зрения своего строения, так и с точки зрения ее функционирования, поскольку она тесно связана со многими другими высшими психическими функциями мозга, такими как

речь, память и мышление. При тугоухости возникает дефицит слуховой информации, что приводит к значительному изменению центральных механизмов слухового восприятия. Таким образом, с появлением уникального метода слухопротезирования – КИ открываются совершенно новые возможности в изучении взаимодействия периферических и центральных механизмов слуховой системы человека.

Кохлеарная имплантация уже более 40 лет успешно используется для компенсации утраченной слуховой функции при тотальной глухоте и глубокой степени тугоухости у людей, которым не помогают самые современные слуховые аппараты. Даже при полной глухоте, при полной гибели наружных и внутренних волосковых клеток органа Корти, слуховой нерв в большинстве случаев остается сохранным и способен возбуждаться под действием электрического раздражения. При хирургическом вмешательстве в тимпанальную лестницу улитки вводят многоканальную электродную решетку, которая возбуждает различные



**Рис. 1.** Расположение электрода в улитке человека.  
1 – улитка внутреннего уха; 2 – слуховой нерв; 3 – электродная решетка.

группы свободных нервных окончаний от вершины до основания улитки, вызывая соответствующие слуховые ощущения в соответствии с тонотопической организацией улитки.

В последние годы отмечается значительный прогресс в области совершенствования систем КИ (Таварткиладзе, 2015; Forli et al., 2021). Тем не менее остается еще много возможностей для их улучшения (Dorman, Wilson, 2004; Chen et al., 2022). Как отмечают большинство авторов, даже пациенты с наилучшими результатами имеют трудности слухового восприятия в сложных акустических условиях, таких как речь в шуме или в ситуации с одновременно несколькими говорящими (Pralus et al., 2021). Наилучшие результаты наблюдаются у взрослых пациентов с постлингвальной глухотой (Dorman, Spahr, 2006) и у глухих детей с врожденной глухотой, проимплантированных в раннем возрасте (Sharma et al., 2020). С возрастом пластичность мозга у детей снижается, и эффективность КИ уменьшается (Glennon et al., 2020). Это обстоятельство может объяснить тот факт, что глухие дети, имплантированные до трех-четырехлетнего возраста, обычно имеют гораздо лучшие результаты, чем глухие дети, имплантированные в более позднем возрасте (Sharma, 2020; Wilson, 2008). Основное предназначение КИ – это обеспечить как можно более полноценное восприятие разговорной речи. Вместе с тем заметим, что одна из самых больших проблем у пациентов с кохлеарными имплантами возникает при восприятии музыки (Limb, 2014).

Речевой сигнал, кроме основных акустических признаков, которые вызывают определенные субъективные слуховые ощущения (громкость, высота и тембр), передает закодированную смысловую информацию. Речевой сигнал характеризуется следующими акустическими параметрами:

основной частотный диапазон 100–7000 Гц, средний уровень разговорной речи 60–70 дБ (уровня звукового давления), динамический диапазон – 35–45 дБ и временные интервалы от нескольких десятков миллисекунд для фонем до сотен миллисекунд для отдельных слов (Алдошина, 2006). Очевидно, что способность человека в определении высоты, громкости, длительности звука и устной речи не может быть одинаковой при акустической и электрической стимуляции слуховой системы ввиду разных областей воздействия на рецепторы внутреннего уха в одном случае и на нейроны клеток спирального ганглия – в другом. Первостепенное значение для слуховой системы имеет восприятие высоты звука.

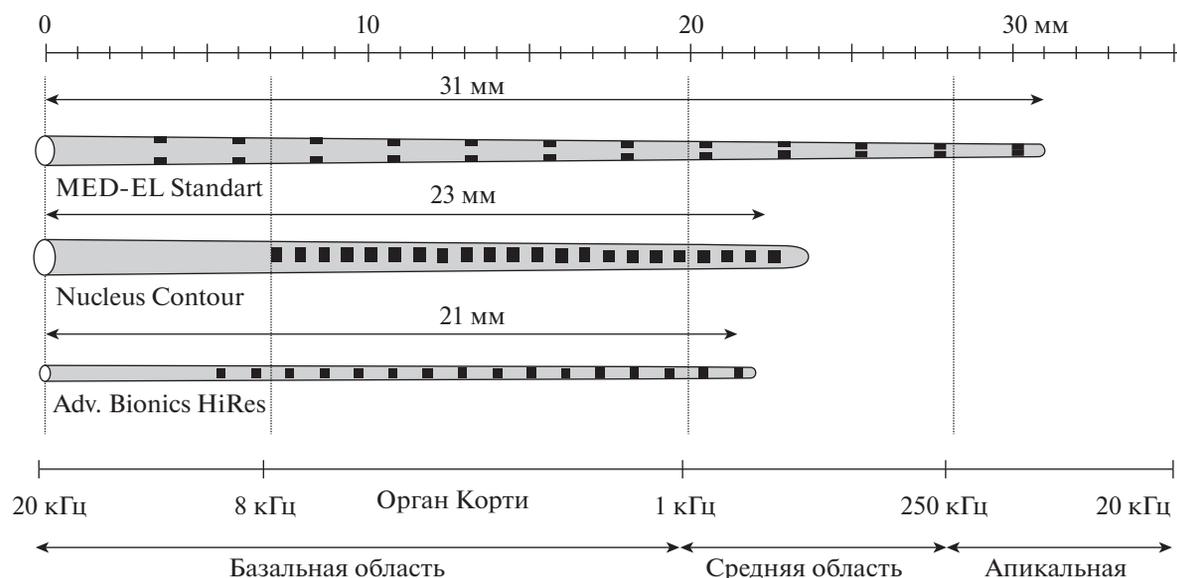
### ВОСПРИЯТИЕ ВЫСОТЫ

Все современные многоканальные системы КИ передают информацию о высоте звука, используя тонотопические карты расположения электродов вдоль базилярной мембраны улитки (Wilson, Dorman, 2008; Forli et al., 2021). Благодаря использованию полосовых фильтров входной акустический сигнал разделяется на несколько частотных каналов, каждый из которых передает определенную полосу частот на свой электрод (рис. 1).

В соответствии с тонотопической организацией улитки низкочастотные сигналы подаются на апикальные, а высокочастотные – на базальные электроды. При этом апикальные нервные волокна (дендриты клеток спирального ганглия) воспринимают низкочастотную, а базальные – высокочастотную информацию, которая по слуховому нерву передается в центральные отделы слуховой системы, где и возникает полный спектр слуховых ощущений.

Центральные частоты полосовых фильтров рассчитывают таким образом, чтобы стимуляция каждого отдельного электрода вдоль всей электродной решетки максимально приближалась к естественной тонотопической карте улитки (Stakhovskaya et al., 2007). Однако на практике трудно достичь полного соответствия тонотопике улитки в расположении электродов. В разных системах КИ электродная решетка имеет разную длину активной ее части и разную глубину введения в улитку (рис. 2), и даже самая большая электродная решетка не может обеспечить правильное тонотопическое распределение частот для всех электродов.

При длине базилярной мембраны 33 мм (Wright et al., 1987), перекрывающей восприятие частот от 20 до 20000 Гц, обеспечение тонотопического распределения частотного диапазона импланта 100–8000 Гц вдоль всей длины электродной решетки является сложной задачей. Большинство электродных решеток не достигают



**Рис. 2.** Расположение электродов (Med-El Standard, Nucleus Contour, Advanced Bionics HiRes) на частотной оси вдоль развернутой улитки.

самых верхушечных завитков улитки, где тонотопически представлены низкие частоты, что препятствует их полноценному восприятию. Ни одна из существующих электродных решеток не может быть вставлена глубже, чем на 30 мм от круглого окна, а в большинстве случаев глубина введения составляет в среднем около 20 мм, что затрудняет восприятие частот ниже 750 Гц (Ketten et al., 1998). Тем не менее известно, что пользователи кохлеарных имплантов хорошо воспринимают все звуки в низкочастотном диапазоне. Согласно классическим представлениям, высота звука определяется не только тонотопической организацией улитки — “теория места”, но и “временной теорией”, которая базируется на анализе временной структуры периодических звуковых сигналов (Zeng, Tang, 2014). При нормальном слухе синхронизация возбуждения в слуховом нерве обеспечивает информацию о высоте на низких частотах вплоть до 5000 Гц (Limb, Alexis Roya, 2014). При электрическом слухе у пользователей КИ высота низкочастотного звука передается с изменением частоты стимуляции только на частотах до 300 Гц (Bissmeyer et al., 2020), что обеспечивает полноценное восприятие частоты основного тона голоса человека. Апикальная (низкочастотная) область улитки имеет важное значение в восприятии тембра голоса и интонации высказывания, она обеспечивает восприятие речевого высказывания как целого (Caldwell et al., 2017). Это, в частности, подтверждается тем фактом, что распознавание речи было лучше у пациентов, которым имплантировали электродную решетку длиной 31.5 мм, чем у пациентов с 28-мм решеткой (Sanfarotta, 2022). Более глубокое вве-

дение электродов улучшало распознавание речи вплоть до угла введения  $600^\circ$ , после чего распознавание не изменялось.

В отличие от низкочастотного слуха восприятие высоких частот определяется, исходя из “теории места” в соответствии с тонотопической организацией улитки или так называемой функцией Гринвуда (Stakhovskaya, 2007). Однако чаще всего запрограммированная центральная частота полосового фильтра и теоретическая частота, рассчитанная в зависимости от расположения электрода вдоль базилярной мембраны, не совпадают. Это несовпадение характерно для базальных завитков улитки, оно обусловлено различиями в размерах улитки, длине электродной решетки, глубине ее введения и приводит к неточному восприятию высоты тона (Sanfarotta, 2022). Эффект несоответствия в большей степени проявляется на высоких частотах, которые при электрическом раздражении переносятся в более высокочастотную область улитки. Он приводит к тому, что речь окружающих людей по словам взрослых, позднооглохших пациентов, воспринимается “как голос у Буратино”. Однако через некоторый период происходит адаптация к новым слуховым ощущениям и восприятие речи становится вполне естественным. По данным Рейсс и соавт. (Reiss et al., 2007), в течение первых лет использования импланта высота тона при раздражении определенным электродом может меняться со временем, иногда на целых две октавы. Вероятно, при этом в центральных отделах происходит перестройка слухового анализа в соответствии с новой тонотопикой улитки (Glennon, 2020). Таким образом, человек воспринимает информацию о

высоте звука как за счет тонотопической организации улитки (частотный анализ), так и за счет информации о периоде звуковой волны (временной анализ). Оба вида информации передаются по одним и тем же нервным волокнам, и теория места и временная теория взаимно дополняют друг друга при объяснении восприятия высоты.

Другой существенной характеристикой слухового восприятия является дифференциальная разрешающая способность по частоте. В многочисленных исследованиях установлено, что человек с нормальным слухом способен различить по высоте два звука, отличающихся всего на 0.2% (Gelfand, 2009). При сенсоневральной тугоухости дифференциальный порог повышается до 1% (Freyman, Nelson, 1991; Бобошко и др., 2017), а у пациентов с кохлеарными имплантами составляет больше 6% (Zeng, Tang, 2014).

Даже в многоканальных системах КИ различные частоты является достаточно сложной задачей, что отражается на качестве слухового восприятия, особенно в сложных акустических условиях (Wagner et al., 2021). Ввиду отсутствия механизма частотной селективности, обусловленного функцией наружных волосковых клеток, а также за счет широкой области растекания электрического тока в улитке, различение высоты у пациентов с кохлеарными имплантами значительно хуже, чем у людей с нормальным слухом. У пользователей кохлеарных имплантов способность различения по частоте была в пределах двух полутонов, в то время как участники с нормальным слухом обнаруживали разницу в один полутоном (Пудов, Стефанович, 2010; Стефанович, Пудов 2013). Различия в два полутона пациенты могли определить даже при раздражении через один электрод. Заметим, что один полутоном соответствует изменению частоты на 6%. Авторы работы (Kang et al., 2009) сообщили, что дифференциальный порог по частоте у пользователей кохлеарных имплантов варьировал от одного до восьми полутонов. Другие авторы отмечали, что пороги различения частоты чистого тона при кохлеарной имплантации варьировали от 1.5 до 9.9% (Goldsworthy, 2015). Вагнер и соавт. (Wagner et al., 2021) изучали распознавание чистого тона при электрическом раздражении через отдельные электроды. Средняя частота правильного принятия решения относительно различия в высоте тона составила около 60% для пользователей кохлеарных имплантов и более 90% при прослушивании того же диапазона частот в группе с нормальным слухом.

Низкая разрешающая способность по частоте у пользователей кохлеарных имплантов проявляется в снижении разборчивости речи и способности восприятия музыки (Wagner et al., 2021). Тургеон и соавт. (Turgeon et al., 2015) впервые проде-

монстрировали взаимосвязь между восприятием высоты тона и уровнем распознавания речи у пользователей кохлеарных имплантов. Авторы показали, что у пользователей кохлеарных имплантов с высоким уровнем распознавания речи порог различения по частоте составляет менее 10%. В то время как у пользователей с низким распознаванием он оказывается около 20%. В последующих работах была установлена высокая корреляционная связь разборчивости речи с частотной разрешающей способностью слуха у пользователей кохлеарных имплантов (Zhang et al., 2019). Таким образом, с одной стороны, дифференциальный порог по частоте можно использовать как простой лингвистический тест для оценки результатов КИ, что особенно важно у детей с низким словарным запасом. С другой стороны, совершенствование технологий КИ должно быть направлено на повышение разрешающей способности по частоте. Изложенное выше позволяет предположить, что слуховая тренировка, направленная на повышение частотной разрешающей способности слуха, будет способствовать улучшению качества восприятия устной речи.

## ВОСПРИЯТИЕ ГРОМКОСТИ

Другой важной характеристикой слухового восприятия является громкость звука. Громкость — это субъективное ощущение, позволяющее слуховой системе оценивать звуки по определенной шкале в зависимости от их интенсивности — от самой малой (звуковое давление  $2 \times 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>) до очень большой (звуковое давление 20 Н/м<sup>2</sup>) интенсивности, что соответствует динамическому диапазону 120 дБ. Динамический диапазон по интенсивности определяет число градаций различной громкости. Дифференциальный порог по интенсивности определяет величину минимального различения по громкости двух звуковых сигналов. У людей с нормальным слухом он составляет порядка 1 дБ, при сенсоневральной тугоухости уменьшается до 0.6–0.8 дБ, а у пользователей кохлеарных имплантов, наоборот, увеличивается до 4–6 дБ (Nikakhlagh et al., 2015). В то же время динамический диапазон у двух последних групп уменьшается, что в свою очередь сказывается на слуховом восприятии сложных акустических сигналов. У пользователей кохлеарных имплантов динамический диапазон определяется свойствами слухового нерва и для единичного волокна он составляет около 6 дБ, но поскольку каждый отдельный электрод стимулирует группу нервных окончаний, динамический диапазон достигает 20 дБ по величине электрического тока (Mereditth et al., 2017). Для того чтобы иметь возможность передавать широкий динамический диапазон звуков в кохлеарных имплантах, используется компрессия динамического диапазона. Однако

компрессия звукового сигнала снижает величину градаций различия громкости, что в свою очередь может отразиться на восприятии речи.

В работе (Spahr et al., 2007) было показано, что увеличение входного динамического диапазона в кохлеарном импланте “Bionic Ear” по сравнению с другими – “Esprit-3G” и “Tempo+”, улучшает разборчивость для всех речевых тестов, в том числе при восприятии гласных и речи в шумных условиях. Однако сами авторы не исключают, что эти различия могут быть обусловлены различием конструкций самих кохлеарных имплантов, использующих разные способы компрессии и шумоподавления. Согласно результатам работы (Loizou et al., 2000), компрессия динамического диапазона по-разному отражается на восприятии различного речевого материала – гласные, согласные и целые предложения. По результатам этой работы сжатие больше всего влияет на распознавание гласных и меньше всего – на распознавание согласных звуков. В то же время сжатие умеренно отражается на распознавании предложений. Таким образом, динамический диапазон по громкости несущественно влияет на способность восприятия устной речи (Kim et al., 2018).

#### ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУХА

Речевые сигналы, как и другие окружающие звуки, меняются с течением времени, что делает временную обработку важным компонентом восприятия разговорной речи. Временная интеграция относится к способности слуховой системы суммировать информацию с увеличением продолжительности сигнала вплоть до критической длительности 200 мс (Plomp et al., 1959). В этом диапазоне порог слухового восприятия повышается с крутизной 10 дБ на десятикратное уменьшение длительности, и короткие сигналы воспринимаются более тихими, что затрудняет их восприятие. При восприятии речи более важной характеристикой слуха оказывается временное разрешение, т.е. способность обнаружения коротких интервалов между двумя сигналами. Временная разрешающая способность слуха составляет около 10 мс и является важной характеристикой в различении временных параметров речи (Divenyi, Shannon, 1983). По мнению автора работы (Rawool, 2006), у детей и у пожилых людей с центральными нарушениями слуха наблюдается дефицит временной обработки, который может повлиять на их способность понимания устной речи.

Спектральное и временное разрешение слуха играет важную роль в восприятии речи, поскольку речь содержит множество контрастных частотных и временных сигналов. Так, одни авторы отмечают высокую взаимосвязь восприятия разговорной речи с частотной разрешающей способ-

ностью слуха (Zhang et al., 2019), а другие придают более важную роль в анализе речи временной разрешающей способности (Dianzhao et al., 2022). Вероятно, что различие этих выводов связано с тем, что разные пользователи кохлеарных имплантов используют различные критерии в восприятии речи – в одних случаях спектральные, а в других временные (Winn et al., 2016). Основываясь на формантной теории восприятия речи, можно предположить, что при различении гласных звуков наиболее важной оказывается частотная разрешающая способность слуха. Однако не исключено, что при низкой частотной разрешающей способности определяющее значение приобретают временные характеристики слуха. У взрослых пользователей кохлеарных имплантов временное разрешение оказывает большое влияние на слуховое различение в сложных условиях прослушивания, например, в условиях шума (Cesur, Derin-su, 2020). С другой стороны, при высокой частотной разрешающей способности слуха у взрослых постлингвальных пользователей кохлеарных имплантов, которые являются носителями мандаринского китайского языка, отмечается хорошая корреляция обнаружения интервала с восприятием двухсложных слов ( $R^2 = 0.45$ ), предложений ( $R^2 = 0.43$ ) и порогом восприятия числительных в шуме ( $R^2 = 0.36$ ) (Dianzhao et al., 2022). Заметим, что у этих пациентов изначально была высокая способность обнаруживать изменение частоты менее 5%. Таким образом, у разных категорий пользователей кохлеарных имплантов ведущую роль в восприятии речи могут играть в одних случаях спектральные, в других временные характеристики слуха, а в третьих – и те и другие.

#### ЦЕНТРАЛЬНЫЕ СЛУХОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ И РЕАБИЛИТАЦИЯ

Обеспечение необходимой частотной и временной разрешающей способности при электрической стимуляции нервных волокон является важной задачей для повышения качества восприятия речи у пользователей кохлеарных имплантов, но ее решения недостаточно для развития языковых навыков и собственной экспрессивной речи, особенно у детей с врожденной глухотой. В формировании устной речи ведущая роль принадлежит центральным отделам слуховой системы.

Исследование корковых слуховых вызванных потенциалов у детей с врожденной глухотой позволило установить существование временной границы для развития центральных слуховых отделов максимально пластичных в своем развитии в возрасте детей до 3.5 лет (Sharma, Dogman, 2006). Если стимуляция проводится в течение данного периода, латентность этих потенциалов достигает нормальных возрастных значений уже в течение трех-шести месяцев после начала сти-

муляции. Если же стимуляция проводится после 7 лет, то латентность меняется очень медленно в течение нескольких лет. С возрастом у ребенка снижается пластичность мозга и затрудняются процессы формирования центральных слуховых механизмов, поэтому необходимо проводить кохлеарную имплантацию у детей как можно в более раннем возрасте (Glennon et al., 2020). Ранний возраст ребенка при кохлеарной имплантации приводит к улучшению развития языковых навыков у детей с врожденной глухотой.

Другим аспектом пластичности является реорганизация коры головного мозга при помощи других сенсорных модальностей, например, зрения. Дети с врожденной глухотой, которым проведена кохлеарная имплантация после окончания сенситивного периода, испытывают значительные трудности с восприятием устной речи на слуховой основе и, как правило, используют слухозрительное восприятие речи с опорой на артикуляцию губ (Sharma, Dorman, 2006).

Все пользователи кохлеарных имплантов независимо от их возраста и уровня речевого развития нуждаются в слухоречевой реабилитации, включающей адаптацию к новым слуховым ощущениям и развитие слухоречевых навыков (Королева, 2009; 2023). На первом этапе реабилитации проводится адаптация к бытовым звукам и формируется способность восприятия высоты, громкости и длительности звуков. Эти ощущения формируются первыми с самого начала реабилитации и совершенствуются в процессе накопления слухового опыта. Слуховая тренировка, направленная на повышение частотной и временной разрешающей способности слуха, в дальнейшем способствует улучшению качества восприятия устной речи.

На втором этапе слухоречевой реабилитации практически одновременно с первым этапом специалистом дефектологом проводится систематическая целенаправленная работа по развитию языковых навыков ребенка (фонетический, лексический и грамматический). При правильной организации процесса реабилитации она позволяет ребенку достаточно быстро научиться понимать отдельные слова и фразы уже по истечении шести месяцев. Затем начинает формироваться экспрессивная речь. С повышением возраста имплантируемого ребенка с врожденной глухотой процесс развития восприятия речи значительно замедляется и требуется длительная работа над развитием слухового восприятия и устной разговорной речи ребенка (Sharma et al., 2020).

Слухоречевая реабилитация после операции кохлеарной имплантации является важной составляющей в развитии слуховых и речевых навыков для всех категорий пользователей кохлеарных имплантов. Ее продолжительность может состав-

лять от нескольких месяцев до нескольких лет. Кроме того, широкий спектр факторов, влияющих на результативность кохлеарной имплантации, предполагает, что для каждого пациента в зависимости от его возраста, длительности глухоты, уровня развития нейрокогнитивной функции и лингвистических навыков необходимо разрабатывать индивидуальный подход к организации процесса реабилитации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кохлеарная имплантация – уникальная технология в реабилитации больных с тяжелой степенью тугоухости и полной глухотой. Тем не менее качество восприятия речи у пользователей КИ существенно ограничено из-за низкой разрешающей способности по частоте, искажения восприятия высоты и сжатия динамического диапазона. По мнению большинства авторов, главным фактором в повышении разборчивости речи, а также способности восприятия музыки является разрешающая способность по частоте (Meredith et al., 2017; Zhang et al., 2019). Другие авторы отмечают высокую корреляцию разборчивости речи с временной разрешающей способностью слуха (Cesur, Derinsu, 2020; Dianzhao et al., 2022). Вероятно, что различие этих результатов связано с тем, что разные пользователи кохлеарных имплантов используют разные критерии в восприятии речи – в одних случаях спектральные, а в других временные (Winn et al., 2016).

И частотная, и временная разрешающая способность являются важными слуховыми характеристиками для повышения качества восприятия речи у пользователей КИ, но ведущая роль в формировании устной речи принадлежит центральным отделам слуховой системы. В процессе слухоречевой реабилитации формируются центральные слуховые механизмы восприятия разговорной речи. Установлено, что слуховая тренировка, направленная на повышение частотной и временной разрешающей способности слуха, способствует улучшению качества восприятия устной речи.

Исследование корковых слуховых вызванных потенциалов у детей с врожденной глухотой позволило установить временные границы для развития центральных слуховых отделов максимально пластичных в своем развитии в возрасте детей до 3.5 лет. С возрастом у ребенка ухудшается пластичность мозга и затрудняются процессы формирования центральных слуховых механизмов, поэтому необходимо проводить кохлеарную имплантацию как можно в раннем возрасте (Glennon et al., 2020).

Дальнейшее изучение особенностей слухового восприятия при электрической стимуляции слу-

хового нерва не только открывает новые возможности в изучении слуховой системы человека, но и позволяет предложить новые подходы для улучшения слуховых способностей пользователей кохлеарных имплантов.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках штатного финансирования научно-практической деятельности государственного бюджетного учреждения.

#### УЧАСТИЕ АВТОРОВ

В.И. Пудов осуществил основную идею работы, сбор и анализ научной литературы, подбор и написание разделов работы. О.В. Зонтова выполняла подбор и анализ научной литературы, проверку теоретических выкладок на опыте практической деятельности, обсуждение основных результатов, написание разделов по протезированию детей и заключение.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. СПб.: Композитор, 2006. 720 с
- Бобошко М.Ю., Бердникова И.П., Салахбеков М.А., Мальцева Н.В. Психоакустические методы в диагностике центральных нарушений слуха при сенсоневральной тугоухости. *Российская оториноларингология*. 2017. № 2 (87). С. 9–16. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2017-2-9-16>
- Королева И.В. Кохлеарная имплантация и слухоречевая реабилитация глухих детей и взрослых. СПб.: КАРО, 2009. 186 с. ISBN 978-5-9925-0348-7.
- Королева И.В. Введение в кохлеарную имплантацию. СПб.: КАРО, 2023. 224 с. ISBN: 978-5-9925-1644-9.
- Пудов В.И., Стефанович М.А. Восприятие музыки пользователями кохлеарных имплантов. *Российская оториноларингология*. 2010. № 2 (45). С. 114–119.
- Стефанович М.А., Пудов В.И. Особенности слуховых ощущений при электродном протезировании. 2013. 126 с. ISBN: 978-3-659-40813-7.
- Таварткиладзе Г.А. Современное состояние и перспективы развития кохлеарной имплантации. *Вестник оториноларингологии*. 2015. № 80 (3). С. 4–9. <https://doi.org/10.17116/otorino20158034-9>
- Bissmeyer S.R., Hossain S., Goldsworthy R.L. Perceptual learning of pitch provided by cochlear implant stimulation rate. *PLoS ONE*. 2020. 15 (12). e0242842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242842>
- Caldwell M.T., Jiam N.T., Limb C.J. Assessment and Improvement of Sound Quality in Cochlear Implant Users. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*. 2017. № 2. P. 110–124. <https://doi.org/10.1002/lio2.71>
- Canfarotta M., Dillon M., Brown K., Pillsbury H., Dedmon M., O'Connell B. Insertion Depth and Cochlear Implant Speech Recognition Outcomes: A Comparative Study of 28- and 31.5-mm Lateral Wall Arrays. *Otol. Neurotol*. 2022. № 43 (2). P. 183–189. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003416>
- Cesur S., Derinsu U. Temporal Processing and Speech Perception Performance in Postlingual Adult Users of Cochlear Implants. *J. Am. Acad. Audiol*. 2020. № 31. P. 129–136. <https://doi.org/10.3766/jaaa.19002>
- Chen F., Chen J., Luo X. New discoveries in the benefits and outcomes of cochlear implantation. *Neurosci., Sec. Auditory Cognitive Neuroscience*. 2022. V. 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1062582>
- Dianzhao X., Jianfen L., Xiuhua Ch. Relationship between the ability to detect frequency changes or temporal gaps and speech perception performance in post-lingual cochlear implant users. *Neurosci., Sec. Auditory Cognitive Neuroscience*. 2022. V. 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.904724>
- Divenyi P., Shannon R. Auditory time constants unified. *J. Acoust. Soc. Am*. 1983. V. 74. S10. <https://doi.org/10.1121/1.2020735>
- Dorman M.F., Spahr A.J. *Speech perception by adults with multichannel implants*. Eds: Waltzman S.B., Roland J.T., Jr. Cochlear Implants, second ed. Thieme Medical Publishers. New York, 2006. 193–204.
- Dorman M.F., Wilson B.S. The design and function of cochlear implants. *Am. Sci*. 2004. V. 92. 436–445.
- Forli F., Lazzarini F., Bruschini L., Danti S., Berrettini S. Recent and future developments in cochlear implant technology: review of the literature. *Otorhino-laryngology*. 2021. V. 71 (3). 196–207. <https://doi.org/10.23736/S2724-6302.21.02379-3>
- Freyman R.L., Nelson D.A. Frequency Discrimination as a Function of Signal Frequency and Level in Normal-Hearing and Hearing-Impaired Listeners. *J. Speech Lang. Hear. Res*. 1991. V. 34. № 6. P. 1371–1386.
- Gelfand S.A. *Hearing: An introduction to psychological and physiological acoustics*. 5th ed. London. Informa Healthcare, 2009. 311 p.
- Glennon E., Svirsky M.A., Froemke R.C. Auditory cortical plasticity in cochlear implant users. *Neurobiol*. 2020. V. 60. P. 108–114.
- Goldsworthy R. Correlations Between Pitch and Phoneme Perception in Cochlear Implant Users and Their Normal Hearing Peers. *J. Assoc. Res. Otolaryngol*. 2015. V. 16 (6). P. 797–809. <https://doi.org/10.1007/s10162-015-0541-9>
- Kang R., Nimmons G.L., Drennan W., Longnion J., Ruffin C., Nie K. Development and validation of the university of Washington clinical assessment of music perception test. *Ear Hear*. 2009. V. 30. P. 411–418. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61bc0>
- Ketten D.R., Skinner M.W., Wang G., Vannier M.W., Gates G.A., Neely J.G. In vivo measures of cochlear length and insertion depth of nucleus cochlear implant electrode arrays. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol*. 1998. Suppl. 175. P. 1–16.
- Kim S.Y., Jeon S.K., Oh S.H., Lee J.H., Suh M.W., Lee S.Y., Lim H.J., Park M.K. Electrical dynamic

- range is only weakly associated with auditory performance and speech recognition in long-term users of cochlear implants. *Intern. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2018. V. 111. P. 170–173.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.06.016>
- Limb Ch.J., Alexis Roya A.T. Technological, biological, and acoustical constraints to music perception in cochlear implant users. *Hearing Research.* 2014. V. 308. P. 13–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.04.009>
- Loizou P., Dorman M., Fitzke J. The Effect of Reduced Dynamic Range on Speech Understanding: Implications for Patients with Cochlear Implants. *Ear and Hearing.* 2000. V. 21 (1). P. 25–31.
- Meredith T., Nicole T., Charles J. Assessment and improvement of sound quality in cochlear implant users. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology.* 2017. V. 2. P. 119–124.  
<https://doi.org/10.1002/lio2.71>
- Nikakhlagh S., Saki N., Karimi M., Mirahmadi S., Rostami M. R. Evaluation of Loudness Perception Performance in Cochlear Implant Users. *Biomed Pharmacol J.* 2015. V. 8.  
<http://biomedpharmajournal.org/?p=2280>
- Plomp R., Bouman M. Relation between Hearing Threshold and Duration for Tone Pulses. *J. Acoust. Soc. Am.* 1959. V. 31. P. 749–758.  
<https://doi.org/10.1121/1.1907781>
- Pralus A., Hermann R., Cholvy F., Aguera P., Moulin A. Rapid Assessment of Non-Verbal Auditory Perception in Normal-Hearing Participants and Cochlear Implant Users. *J. Clin. Med.* 2021. V. 10(10). P. 90–93.  
<https://doi.org/10.3390/jcm10102093>
- Rawool V.W. A temporal processing primer. *Hearing Review.* 2006. V. 13 (5). P. 30–34.
- Reiss L.A., Turner C.W., Erenberg S.R., Gantz B.J. Changes in pitch with a cochlear implant over time. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 2007. V. 8 (2). P. 241–257.  
<https://doi.org/10.1007/s10162-007-0077-8>
- Sharma S.D., Cushing S.L., Papsin B.C., Gordon K.A. Hearing and speech benefits of cochlear implantation in children: A review of the literature. *J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2020. V. 133. 109984.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2020.109984>
- Sharma A., Dorman M. Central auditory development in children with cochlear implants: clinical implications. *Adv. Otorhinolaryngol.* 2006. V. 64. P. 66–88.  
<https://doi.org/10.1159/000094646>
- Stakhovskaya O., Sridhar D., Bonham B.H., Leake P.A. Frequency map for the human cochlear spiral ganglion: implications for cochlear implants. *J. Assoc Res Otolaryngol.* 2007. V. 8. P. 22–33.  
<https://doi.org/10.1007/s10162-007-0076-9>
- Turgeon C., Champoux F., Lepore F., Ellemberg D. Deficits in auditory frequency discrimination and speech recognition in cochlear implant users. *Cochlear Implants Int.* 2015. V. 16 (2). P. 88–94.  
<https://doi.org/10.1179/1754762814Y.0000000091>  
 PMID: 25117940
- Wagner L., Altindal R., Plontke S.K. et al. Pure tone discrimination with cochlear implants and filter-band spread. *Sci Rep.* 2021. V. 11. 20236.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-99799-4>
- Wilson B., Dorman M. Cochlear implants: A remarkable past and a brilliant future. *Hearing Research.* 2008. V. 242. P. 3–21.
- Wilson B.S., Finley C.C., Lawson D.T., Wolford R.D., Edgington D.K., Rabinowitz W.M. Better speech recognition with cochlear implants. *Nature.* 1991. V. 352. P. 236–238.
- Winn M., Won J., Moon I. Assessment of spectral and temporal resolution in cochlear implant users using psychoacoustic discrimination and speech cue categorization. *Ear. Hear.* 2016. V. 37 (6). P. 377–390.  
<https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000328>
- Wright A., Davis A., Bredberg G., Ulehlova L., Spencer H. Hair cell distributions in the normal human cochlea. *Acta Otolaryngol.* 1987. Suppl. 444. P. 1–48.
- Zeng F., Tang Q., Lu T. Abnormal Pitch Perception Produced by Cochlear Implant Stimulation. *PLoS ONE.* 2014. V. 9 (2). 8 p. e88662.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088662>
- Zhang F., Underwood G., Mc Guire K., Liang C., Moore D., Jie Fu Q. Frequency change detection and speech perception in cochlear implant users. *Hearing Research.* 2019. V. 379. P. 12–20.

## Hearing perception by cochlear implantation

V. I. Pudov<sup>a,\*</sup> and O. V. Zontova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Saint-Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech Russian Federation  
 190013 St. Petersburg, st. Broomitskaya, 9, Russia

\*E-mail: v\_pudov@mail.ru

Cochlear implantation is a unique development in the field of prosthetics of human sensory systems. Due to the electrical stimulation of the auditory nerve, auditory sensations close to natural occur. Despite significant progress in the engineering design of cochlear implants (CI), the quality of auditory perception when used is significantly limited. CI users experience the greatest difficulties in communication tasks such as understanding speech in noise or in multi-talkers environment. There are many factors, both technical and physiological, to reduce speech intelligibility in CI users. Speech perception in CI users is limited due to low frequency resolution, perceptual distortion of pitch, and compression of dynamic range. Low frequency resolution is the reason a decrease in speech intelligibility and the ability to perceive music. To realize these ability the question about the state of central hearing mechanisms, especially for children with congenital deafness, is crucial

Neuroplasticity with ages decreases and the central auditory processing deficiency develops, therefore, it is desirable to carry out cochlear implantation as early as possible after hearing loss identification. Analysis of the auditory perception features in case of the auditory nerve is electrically excited allows not only to propose innovative approaches to improve the auditory abilities of CI users, but also to study auditory processing disorders.

*Key words:* cochlear implantation, pitch, loudness, differential frequency threshold, speech intelligibility

## REFERENCES

- Aldoshina I.A., Pritts R. *Muzikal'nay acustica* [Musical acoustics]. St. Petersburg: Composer, 2006. 720 p. (in Russian).
- Bissmeyer S.R., Hossain S., Goldsworthy R.L. Perceptual learning of pitch provided by cochlear implant stimulation rate. *PLoS ONE*. 2020. 15 (12). e0242842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242842>
- Boboshko M.Yu., Berdnikova I.P., Salakhbekov M.A., Maltseva N.V. *Psichoacusticheskie metodu v diagnostike centralinuch naruschenii slucha pri sensonevralnoi tugouchosti* [Psychoacoustic methods in the diagnosis of central hearing disorders in sensorineural hearing loss]. *Rossiiskay otorinolaryngologii* [Russian Otorhinolaryngology]. 2017. № 2 (87). P. 9–16 (in Russian). <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2017-2-9-16>
- Caldwell M.T., Jiam N.T., Limb C.J. Assessment and Improvement of Sound Quality in Cochlear Implant Users. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*. 2017. № 2. P. 110–124. <https://doi.org/10.1002/lio2.71>
- Canfarotta M., Dillon M., Brown K., Pillsbury H., Dedmon M., O'Connell B. Insertion Depth and Cochlear Implant Speech Recognition Outcomes: A Comparative Study of 28- and 31.5-mm Lateral Wall Arrays. *Otol. Neurotol*. 2022. № 43 (2). P. 183–189. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003416>
- Cesur S., Derinsu U. Temporal Processing and Speech Perception Performance in Postlingual Adult Users of Cochlear Implants. *J. Am. Acad. Audiol*. 2020. № 31. P. 129–136. <https://doi.org/10.3766/jaaa.19002>
- Chen F., Chen J., Luo X. New discoveries in the benefits and outcomes of cochlear implantation. *Neurosci., Sec. Auditory Cognitive Neuroscience*. 2022. V. 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1062582>
- Dianzhao X., Jianfen L., Xiuhua Ch. et al. Relationship between the ability to detect frequency changes or temporal gaps and speech perception performance in postlingual cochlear implant users. *Neurosci., Sec. Auditory Cognitive*. 2022. V. 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.904724>
- Divenyi P., Shannon R. Auditory time constants unified. *J. Acoust. Soc. Am*. 1983. V. 74. S10. <https://doi.org/10.1121/1.2020735>
- Dorman M.F., Spahr A.J. *Speech perception by adults with multichannel implants*. Eds. Waltzman S.B., Roland J.T., Jr. Cochlear Implants, second ed. Thieme Medical Publishers. New York, 2006. 193–204.
- Dorman M.F., Wilson B.S. The design and function of cochlear implants. *Am. Sci*. 2004. V. 92. 436–445.
- Forli F., Lazzarini F., Bruschini L., Danti S., Berrettini S. Recent and future developments in cochlear implant technology: review of the literature. *Otorhino-laryngology*. 2021. V. 71 (3). 196–207. <https://doi.org/10.23736/S2724-6302.21.02379-3>
- Freyman R.L., Nelson D.A. Frequency Discrimination as a Function of Signal Frequency and Level in Normal-Hearing and Hearing-Impaired Listeners. *J. Speech Lang. Hear. Res*. 1991. V. 34. № 6. P. 1371–1386.
- Gelfand S.A. *Hearing: An introduction to psychological and physiological acoustics*. 5th ed. London. Informa Healthcare, 2009. 311 p.
- Glennon E., Svirsky M.A., Froemke R.C. Auditory cortical plasticity in cochlear implant users. *Neurobiol*. 2020. V. 60. P. 108–114.
- Goldsworthy R. Correlations Between Pitch and Phoneme Perception in Cochlear Implant Users and Their Normal Hearing Peers. *J. Assoc. Res. Otolaryngol*. 2015. V. 16 (6). P. 797–809. <https://doi.org/10.1007/s10162-015-0541-9>
- Kang R., Nimmons G.L., Drennan W., Longnion J., Ruffin C., Nie K., et al. Development and validation of the university of Washington clinical assessment of music perception test. *Ear Hear*. 2009. V. 30. P. 411–418. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61bc0>
- Ketten D.R., Skinner M.W., Wang G., Vannier M.W., Gates G.A., Neely J.G. In vivo measures of cochlear length and insertion depth of nucleus cochlear implant electrode arrays. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol*. 1998. Suppl. 175. P. 1–16.
- Kim S.Y., Jeon S.K., Oh S.H., Lee J.H., Suh M.W., Lee S.Y., Lim H.J., Park M.K. Electrical dynamic range is only weakly associated with auditory performance and speech recognition in long-term users of cochlear implants. *Intern. J. Pediatric Otorhinolaryngol*. 2018. V. 111. P. 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.06.016>
- Koroleva I.V. *Kochlearnay implantaciy i sluchorecheyay reabilitaciy gluchich detei i vzrosluch* [Cochlear implantation and auditory-speech rehabilitation of deaf children and adults]. SPb. KARO, 2009. 186 p. ISBN 978-5-9925-0348-7 (in Russian).
- Koroleva I.V. *Vvedenie v kochlearnuy implantaciy* [Introduction to cochlear implantation]. SPb. KARO, 2023. 224 p. ISBN: 978-5-9925-1644-9 (in Russian).
- Limb Ch.J., Alexis Roya A.T. Technological, biological, and acoustical constraints to music perception in cochlear implant users. *Hearing Research*. 2014. V. 308. P. 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.04.009>
- Loizou P., Dorman M., Fitzke J. The Effect of Reduced Dynamic Range on Speech Understanding: Implications for Patients with Cochlear Implants. *Ear and Hearing*. 2000. V. 21 (1). P. 25–31.
- Meredith T., Nicole T., Charles J. Assessment and improvement of sound quality in cochlear implant users.

- Laryngoscope Investigative Otolaryngology*. 2017. V. 2. P. 119–124. <https://doi.org/10.1002/lio2.71>
- Nikakhlagh S., Saki N., Karimi M., Mirahmadi S., Rostami M. R. Evaluation of Loudness Perception Performance in Cochlear Implant Users. *Biomed Pharmacol J*. 2015. V. 8. <http://biomedpharmajournal.org/?p=2280>
- Plomp R., Bouman M. Relation between Hearing Threshold and Duration for Tone Pulses. *J Acoust Soc Am*. 1959. V. 31. P. 749–758. <https://doi.org/10.1121/1.1907781>
- Pralus A., Hermann R., Cholvy F., Aguera P., Moulin A. Rapid Assessment of Non-Verbal Auditory Perception in Normal-Hearing Participants and Cochlear Implant Users. *J. Clin. Med*. 2021. V. 10 (10). P. 90–93. <https://doi.org/10.3390/jcm10102093>
- Pudov V.I., Stefanovich M.A. *Vospriyatie muziki polizovatelymi kochlearnuch implantov* [Perception of music by cochlear implant users]. *Rossiiskay otorinolaringologiy* [Russian Otorhinology]. 2010. № 2 (45). P. 114–119 (in Russian).
- Rawool V.W. A temporal processing primer. *Hearing Review*. 2006. V. 13 (5). P. 30–34. [hearingreview.com](http://hearingreview.com).
- Reiss L.A., Turner C.W., Erenberg S.R., Gantz B.J. Changes in pitch with a cochlear implant over time. *J. Assoc. Res. Otolaryngol*. 2007. V. 8 (2). P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10162-007-0077-8>
- Sharma S.D.; Cushing S.L., Papsin B.C., Gordon K.A. Hearing and speech benefits of cochlear implantation in children: A review of the literature. *J. Pediatr. Otorhinolaryngol*. 2020. V. 133. 109984. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2020.109984>
- Sharma A., Dorman M. Central auditory development in children with cochlear implants: clinical implications. *Adv Otorhinolaryngol*. 2006. V. 64. P. 66–88. <https://doi.org/10.1159/000094646>
- Stakhovskaya O., Sridhar D., Bonham B.H., Leake P.A. Frequency map for the human cochlear spiral ganglion: implications for cochlear implants. *J. Assoc. Res. Otolaryngol*. 2007. V. 8. P. 22–33. <https://doi.org/10.1007/s10162-007-0076-9>
- Stefanovich M.A., Pudov V.I. *Osobennosti sluchovuch oschuschenii pri elektrodnom protezirovanii* [Features of auditory sensations during electrode prosthetics]. 2013. 126 p. ISBN: 978-3-659-40813-7 (in Russian).
- Tavartkiladze G.A. *Sovremennoe sostoynie i perspektivu razvitiy kochlearnoi implantacii* [The current state and prospects of the development of cochlear implantation]. *Vestnik otorinolaringologii* [Vestnik Oto-Rinolaringologii]. 2015. № 80 (3). P. 4–9. <https://doi.org/10.17116/otorino20158034-9> (in Russian).
- Turgeon C., Champoux F., Lepore F., Ellemberg D. Deficits in auditory frequency discrimination and speech recognition in cochlear implant users. *Cochlear Implants Int*. 2015. V. 16 (2). P. 88–94. <https://doi.org/10.1179/1754762814Y.0000000091> PMID: 25117940
- Wagner L., Altindal R., Plontke S.K. et al. Pure tone discrimination with cochlear implants and filter-band spread. *Sci Rep*. 2021. V. 11. 20236. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99799-4>
- Wilson B., Dorman M. Cochlear implants: A remarkable past and a brilliant future. *Hearing Research*. 2008. V. 242. P. 3–21.
- Wilson B.S., Finley C.C., Lawson D.T., Wolford R.D., Edgington D.K., Rabinowitz W.M. Better speech recognition with cochlear implants. *Nature*. 1991. V. 352. P. 236–238.
- Winn M., Won J., Moon I. Assessment of spectral and temporal resolution in cochlear implant users using psychoacoustic discrimination and speech cue categorization. *Ear. Hear*. 2016. V. 37 (6). P. 377–390. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000328>
- Wright A., Davis A., Bredberg G., Ulehlova L., Spencer H. Hair cell distributions in the normal human cochlea. *Acta Otolaryngol*. 1987. Suppl. 444. P. 1–48.
- Zeng F., Tang Q., Lu T. Abnormal Pitch Perception Produced by Cochlear Implant Stimulation. *PLoS ONE*. 2014. V. 9 (2). 8 p. e88662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088662>
- Zhang F., Underwood G., Mc Guire K., Liang C., Moore D., Jie Fu Q. Frequency change detection and speech perception in cochlear implant users. *Hearing Research*. 2019. V. 379. P. 12–20.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЛАБИРИНТА ВНУТРЕННЕГО УХА

© 2023 г. Л. В. Торопчина<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования”  
Министерства здравоохранения РФ  
125993 Москва, ул. Баррикадная, д. 2/1, стр. 1, Россия

\*E-mail: [liyatoropchina@yandex.ru](mailto:liyatoropchina@yandex.ru)

Поступила в редакцию 05.04.2023 г.

После доработки 29.05.2023 г.

Принята к публикации 18.09.2023 г.

Моделирование распространения звуковых колебаний от подножной пластинки стремени в овальном окне к воспринимающим образованиям кортиевого органа представляет собой сложную экспериментальную задачу. В поиске причин тугоухости тональная пороговая аудиометрия традиционно рассматривалась как основа диагностики. Наличие костно-воздушного интервала на аудиограмме ассоциировалось с нарушением функции среднего уха, однако, во многих случаях костно-воздушный интервал выявляется при локализации патологии в структурах внутреннего уха. В обзоре показано, что патологические состояния, нарушающие внутриулитковое звукопроводение, успешно выявляются применением компьютерной томографии височных костей. Выполнена классификация патологических состояний лабиринта, дающих костно-воздушный интервал на тональной пороговой аудиограмме.

*Ключевые слова:* кондуктивная тугоухость, сенсоневральная тугоухость, смешанная тугоухость, звукопроводение, звуковосприятие, внутриулитковое звукопроводение, костно-воздушный интервал, тональная пороговая аудиометрия, мальформации внутреннего уха, компьютерная томография височных костей

**DOI:** 10.31857/S023500922304008X, **EDN:** QZEBIS

### ВВЕДЕНИЕ

Диагностика патологических состояний отдельных структур уха всегда представляла интерес для исследователей слуха и отитов, однако, аудиологические методы исследования, сложившиеся исторически, в ряде случаев могут ее затруднять. В настоящем обзоре представлены данные о современных возможностях диагностики и дифференциальной диагностики патологии структур лабиринта внутреннего уха.

### ЗВУКОПРОВЕДЕНИЕ И ЗВУКОВОСПРИЯТИЕ

В 1851 г. итальянский гистолог Альфонсо Корти разработал новую методику окрашивания образцов, которая позволила ему рассмотреть и описать неизвестные ранее структуры улитки внутреннего уха. Открытие органа Корти и детальное описание его компонентов, сделанное в этом периоде другими гистологами и накопленные данные фундаментальных исследований в области физиологии слуха (теория тонотопической организации улитки Дюверни и Мариотта,

1683; учение о специфической энергии органов чувств Мюллера, 1835), позволили в 1863 г. Герману Гельмгольцу создать “резонансную” теорию слуха. Согласно этой теории, первичный анализ звуков происходит в улитке, а базилярная мембрана кортиевого органа является структурой, где заканчивается звукопроводение и начинается звуковосприятие (Politzer, 1913).

Развитию и детализации представлений о звукопроводении и звуковосприятии способствовали активное использование камертонов и разработка камертональных проб немецкими отоларингами во главе с Фридрихом Бецольдом во второй половине XIX века. Они накопили факты о том, что звукопроводение может осуществляться двумя путями — через воздух и через кости черепа. Изучение костной проводимости, как одного из путей доставки звуковых волн к рецепторам улитки, выявило, что нормальное восприятие звуков через кости черепа является показателем сохранности рецепторного аппарата улитки, и этот тип проведения может нормально работать у некоторых людей с нарушениями слуха, когда воздушная проводимость уже снижена.

Камертональные пробы, помимо помощи в различении нарушений звукопроводения и звуковосприятия, ввели в аудиологию понятия “воздушная” и “костная” проводимость и противопоставили их друг другу. Однако здесь имелись нюансы, на которые обращали внимание ведущие исследователи костной проводимости. В.И. Воячек писал, что “понятия костной и воздушной проводимости не могут быть вполне отделены друг от друга (Воячек, 1934). Разница лишь в том, что при воздушной проводимости звуковые колебания подвергаются сначала некоторой обработке в звукопроводящем аппарате, в то время как звуки, проникающие непосредственно через череп, или как бы “пронизывающие” наше тело в любом месте, этой обработке не подвергаются или в ней не нуждаются”.

Г.Г. Куликовский писал, что путь проникновения звуков через кости, хрящи, мышцы и другие более или менее плотные ткани организма, “окружающие” лабиринт, называется “костной проводимостью” условно. “Если мы говорим, что слуховой аппарат разделяется на две части — проводящую и воспринимающую, то к проводящей должны отнести не только наружное ухо и барабанную полость с цепью слуховых косточек, но и все без исключения плотные ткани и жидкие среды, окружающие кохлеарный нервный прибор. Такое понятие о костной (тканевой) проводимости легче противопоставляется понятию воздушной проводимости, при которой звуковые колебания достигают внутреннего уха через воздух, находящийся между источником звука и ухом” (Куликовский, 1939).

В первой половине XX века видные советские оториноларингологи — Я.С. Темкин, А.Н. Лихачев, Б.С. Преображенский формулировали процессы звукопроводения и звуковосприятия следующим образом: “Акустическая часть уха выполняет две различные функции: доставку звуков к рецептору, являющуюся чисто физической функцией, и восприятие, являющееся физиологическим процессом, реакцией нервной ткани на адекватное раздражение. В соответствии с этими функциями различают звукопроводящий и звуковоспринимающий аппараты. В проведении звуковых колебаний принимают участие следующие элементы органа слуха: наружный слуховой проход, барабанная перепонка, слуховые косточки (молоточек, наковальня и стремя), мембрана круглого окна, перилимфа, выполняющая костные каналы улитки, основная и рейсснерова мембрана. В состав звуковоспринимающего аппарата в пределах височной кости входят волосковые клетки кортиевого органа, нервные волокна, ганглиозные клетки и ствол *n. acustici*” (Темкин и др., 1947). Границей между звукопроводением и звуковосприятием авторы считали момент сопри-

косновений слуховых волосков с покровной мембраной.

Функциональное деление уха на звукопроводящий и звуковоспринимающий аппараты не совпадало с анатомическим делением уха на три части, которое впервые в истории сделал итальянский врач и анатом Антонио Вальсальва, приняв мембранозные структуры за границы между частями уха (Valsalva, 1704). По этому вопросу В.И. Воячек писал: “Периферический отдел слухового анализатора принято делить по функциональному признаку на звукопроводящую и звуковоспринимающую части. При более грубом разграничении первая часть включает в себя наружное и среднее ухо, а вторая — внутреннее. При более тонком — граница проводится внутри ушного лабиринта, причем перилимфу и эндолимфу считают еще только проводящим, а волосатые клетки уже воспринимающим органом” (Воячек, 1953).

### КАМЕРТОНАЛЬНАЯ ПРОБА РИННЕ

Ключевым тестом для дифференциальной диагностики нарушений звукопроводения и звуковосприятия среди множества камертональных проб стал тест, описанный Фридрихом Ринне в 1855 г. В нем сравнивалась продолжительность восприятия звука в больном ухе путем костной проводимости и воздушной проводимости. Сначала камертон ставят на сосцевидный отросток. При прекращении восприятия звука камертона его подносят к ушной раковине. В норме и при нарушении звуковосприятия воздушная проводимость преобладает над костной. При нарушении звукопроводения звук камертона около ушной раковины не слышен, и в этом случае “можно предположить заболевание одного из отделов проводящего аппарата, в том числе и мембраны овального окна” (Rinne, 1855). Из этого следует, что Ринне придерживался взглядов Бецольда, который, разделяя звукопроводение и звуковосприятие как физиологические функции, к звукопроводящему аппарату относил структуры наружного и среднего уха до аннулярной связки стремени включительно, а содержимое лабиринта относил к звуковоспринимающему аппарату. Бецольд высоко оценивал тест Ринне как “наиболее чувствительный индикатор патологии звукопроводящего аппарата”, но также писал, что “тест сыграл важную роль в дифференциальной диагностике патологии среднего и внутреннего уха” (Bezold, Siebenmann, 1908).

Вероятно, в эпоху активного использования камертональных проб при отсутствии других методов аудиологической оценки слуха, патология среднего уха стала ассоциироваться с нарушением звукопроводения, патология внутреннего уха — с нарушением звуковосприятия, а внутриулит-

ковое звукопроведение (перилимфатическое и эндолимфатическое пространства, круглое окно лабиринта) как часть проведения энергии механических колебаний к рецепторному аппарату улитки “выпало” из внимания.

Несмотря на сложность, многогранность и недостаточную изученность явления костной проводимости, на разнице в механизмах костной и воздушной проводимости базируется дифференциальная диагностика поражений звукопроводящего и звуковоспринимающего аппаратов.

В зависимости от того, какой физиологический механизм в ухе является поврежденным, все нарушения слуха разделяют на нарушения звукопроводения и звуковосприятия. В аудиологической литературе синонимом нарушений звукопроводения стала кондуктивная, а синонимом нарушений звуковосприятия – сенсоневральная тугоухость. При сочетании нарушений говорят о смешанной тугоухости. Такое деление тугоухости было извлечено из арсенала камертональных исследований и упрощенно стало подразумевать разграничение поражения среднего (в меньшей степени наружного) и внутреннего уха, т.е. произошло смешение понятий “нарушение функции” и “локализация патологии”.

По мнению Б.М. Сагаловича и В.Т. Пальчуна, камертональная оценка слуха, детально и длительное время разрабатывавшаяся в оториноларингологии, дала ответ на вопрос о звукопроводящей или звуковоспринимающей форме тугоухости только “при самом первом приближении”, что оказалось совсем недостаточно для описания многообразия нарушений слуха при отиатрической патологии (Сагалович, Пальчун, 1999).

### ТОНАЛЬНАЯ ПОРОГОВАЯ АУДИОМЕТРИЯ

Термины “кондуктивная”, “сенсоневральная” и “смешанная” тугоухости остались в аудиологии и дальше, когда основой исследования слуха стала тональная пороговая аудиометрия (ТПА).

С внедрением в аудиологическую практику аудиометров, вид тугоухости начали определять по наличию костно-воздушного интервала (КВИ) на ТПА, основываясь на предположении, что стимуляция костным вибратором напрямую возбуждает рецепторы внутреннего уха, минуя среднее ухо. КВИ определялся, если пороги по воздушному проведению на 15 и более дБ выше, чем пороги по костному звукопроведению (Glasscock et al., 1990). Повышение порогов по воздушному звукопроведению, при нормальных по костному, с КВИ между ними, стало расцениваться как аудиологический симптом нарушения воздушно-звукопроводения, называться кондуктивной тугоухостью и ассоциироваться с поражением структур среднего уха (при отсутствии явной па-

тологии в наружном ухе). Повышенные пороги по костному и воздушному звукопроведению с КВИ между ними от 15 дБ и выше считались за смешанную тугоухость.

По мере внедрения ТПА в клиническую практику выяснилось, что КВИ на ТПА может быть ложный и истинный. Ложный КВИ может появиться при использовании телефонов как костного, так и воздушного проведения звуков – на низких или на высоких частотах.

Причинами ложного КВИ при определении порогов слуха костным телефоном являются тактильные ответы, когда пациенты с большой потерей слуха не слышат звуки, а чувствуют вибрации (Nober, 1970) и акустические излучения – ложные пороговые значения костной проводимости на частотах выше 2000 Гц у пациентов с сенсоневральной тугоухостью (Margolis et al., 2013).

Причинами появления КВИ на ТПА при исследовании слуха головными телефонами воздушной проводимости являются тактильные ответы, когда пациенты с большой потерей слуха ощущают давление воздуха на перепонку (Nober, 1967) и спадение наружного слухового прохода при чрезмерно подвижной ушной раковине (Ross, Tucker, 1965; Coles, 1967).

Если исключить ложные КВИ, то повышенные пороги слуха по костной проводимости должны указывать на нарушение звуковосприятия, а нормальные пороги по костной и повышенные по воздушной проводимости – на нарушение звукопроводения. Однако в литературе стали накапливаться наблюдения, что если хорошая костная проводимость всегда указывает на сохранность кортиевого органа, то плохая не всегда указывает на его поражение. Тондорф на основе экспериментов на животных (Tonndorf, 1988) показал, что зубец Кархарта вызывается дефектами цепи слуховых косточек или тугоподвижностью стремени, и доказал, что не все нарушения костной проводимости являются признаком сенсоневральной тугоухости, т.е. дефектов внутреннего уха. Этот аудиометрический феномен был назван им “псевдосенсоневральная тугоухость”.

Также были описаны случаи наличия КВИ при интактном среднем ухе. Необъяснимый КВИ на низких частотах, называемый некоторыми авторами “ложным КВИ” (Parving, Bak-Pedersen, 1978), приводил к диагностическим тимпанотомиям, с выявлением интактного среднего уха (Rudmin, 1983) и часто выявлялся у пациентов с болезнью Меньера, в основе которой лежит развитие эндолимфатического гидропса внутреннего уха. Для описания КВИ на ТПА при болезни Меньера использовали термины “идиопатическая лабиринтопатия” (Ундриц, 1958), “тугоухость при эндолимфатическом гидропсе” (Храп-

по, 1997) и “квазинейросенсорная тугоухость” (Сагалович, Пальчун, 1999), подчеркивая, что такой вид тугоухости отличается от истинной нейросенсорной тугоухости и причиной этого является эндолимфатический гидропс.

Таким образом, использование в практике ТПА привело к появлению дополнительных путающих терминов и позволяло получить только условный “аудиологический профиль каждого заболевания в пределах заданного частотного диапазона” (Сагалович, Пальчун, 1999).

## ВНУТРИУЛИТКОВОЕ ЗВУКОПРОВЕДЕНИЕ

Распространение звуковых колебаний от подножной пластинки стремени в овальном окне к воспринимающим образованиям кортиевого органа на базилярной мембране было недостаточно изучено из-за сложности моделирования экспериментов. Однако было понятно, что для проведения звуковой волны внутри улитки имеют значение плотность пери- и эндолимфы, механические свойства базилярной мембраны и мембраны круглого окна. Предполагалось, что все эти параметры подвержены изменениям под влиянием различных факторов, однако все рассуждения имели значительную долю гипотетичности. В то же время важность вопроса дифференциальной диагностики кондуктивной и сенсоневральной тугоухости заставляла выделять эту форму нарушения звукопроводения в классификации тугоухости. В отечественной литературе упоминаются три формы внутрилабиринтных нарушений слуха — скалярная, скалярно-кохлеарная и кохлеарная. Скалярная форма отражала нарушение внутриулиткового звукопроводения (Капустина, 1999). Б.М. Сагалович выделял нарушение звукопроводения в наружном ухе, в среднем ухе, во внутреннем ухе, нарушение рецепторной функции внутреннего уха, ретрокохлеарные периферические нарушения слуха и центральные нарушения слуха. Признаком нарушения внутриулиткового звукопроводения, даже без существенного КВИ на ТПА, он считал сохранение нормальной слуховой чувствительности к ультразвукам и 100% разборчивость речи (Сагалович, 1978).

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ВИСОЧНЫХ КОСТЕЙ

Активное использование в клинической практике компьютерной томографии (КТ) височных костей для поиска причин тугоухости расширило представление о врожденных мальформациях и приобретенных заболеваниях внутреннего уха, и позволило выявить группу патологических состояний лабиринта внутреннего уха, которые на ТПА демонстрировали КВИ.

Появились работы, доказывающие, что КВИ может присутствовать на ТПА у пациентов с патологией, локализованной в структурах лабиринта внутреннего уха, и наличие КВИ на ТПА не может являться индикатором локализации патологии в структурах среднего уха. Первыми из этой группы патологических состояний были описаны X-сцепленная тугоухость с gusher-синдромом стремени (Snik et al., 1995), дегисценция верхнего полукружного канала (Minor, 2000).

Появились и новые определения — псевдокондуктивная тугоухость (Bance, 2004), необъяснимая кондуктивная тугоухость (Mikulec et al. 2004), интралабиринтная кондуктивная тугоухость (Castellucci et al., 2013).

## ПАТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ НАРУШЕНИЙ ВНУТРИУЛИТКОВОГО ЗВУКОПРОВЕДЕНИЯ

Анализ данных литературы позволил создать классификацию патологических состояний, нарушающих внутриулитковое звукопроводение и демонстрирующих во многих случаях КВИ на ТПА при интактном среднем ухе.

По патогенетическому механизму описанные патологические состояния можно разделить на несколько групп (табл. 1).

Первую группу составляют различного рода препятствия на пути передачи механических колебаний перилимфы в перилимфатическом пространстве — интракохлеарная шваннома в базальном завитке улитки (Reda et al., 2021); врожденные стеноз/атрезия круглого окна (Martin et al., 2002; Wong et al., 2020); закрытие ниши круглого окна поствоспалительными рубцами, спайками, очагом отосклероза, высокой луковицей яремной вены, гломусной опухолью (Benson et al., 2020) (рис. 1).

Вторая группа объединяет разнородные патологические состояния костного лабиринта внутреннего уха, приводящие к излишнему контакту перилимфатического пространства с окружающими анатомическими структурами — так называемое, третье “мобильное” окно лабиринта (рис. 2).

Третье “мобильное” окно лабиринта успешно мимикрирует заболевания среднего уха за счет наличия КВИ на ТПА, и характеризуется дополнительной, третьей, коммуникацией костного лабиринта (помимо овального окна преддверия и круглого окна улитки) с окружающими структурами (Mikulec et al., 2004; Bance, 2004; Merchant et al., 2007). Это может быть дефект костной капсулы лабиринта или расширение имеющихся в норме анатомических коммуникаций.

К дефектам костной стенки лабиринта относятся врожденные или приобретенные дегисцен-

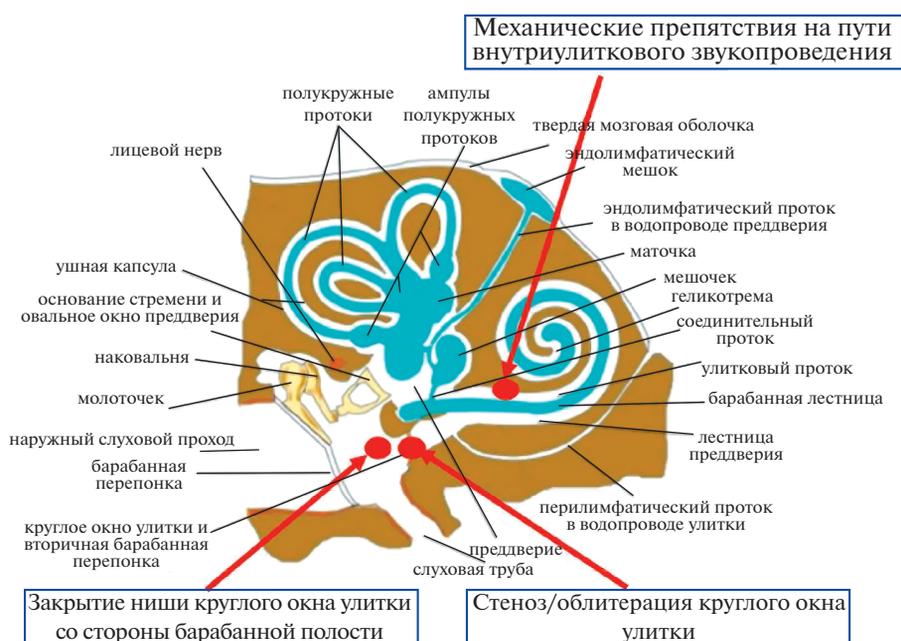
**Таблица 1.** Классификация патологических состояний лабиринта внутреннего уха, вызывающих нарушение внутриулиткового звукопроведения

Патогенетический механизм		Нозологические формы
<p>Препятствия на пути передачи механических колебаний перилимфы в перилимфатическом пространстве</p> <p>Патологический контакт перилимфатического пространства с окружающими структурами – третье “мобильное” окно лабиринта</p> <p>Нарушение гомеостаза эндолимфатического пространства</p>	<p>Дефект костной капсулы лабиринта (единичный или множественные)</p> <p>Расширение имеющихся в норме анатомических коммуникаций</p> <p>Нарушение циркуляции эндолимфы</p> <p>Избыточная продукция эндолимфы</p> <p>Нарушение оттока эндолимфы</p>	<p>Интракохлеарные опухоли</p> <p>Закрытое круглое окно</p> <p>Дегисценции:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– полукружных каналов</li> <li>– улитки</li> <li>– стенок водопроводов улитки и преддверия</li> <li>– при системных заболеваниях костной ткани</li> <li>– X-сцепленная тугоухость с “gusher” – синдромом степени</li> <li>– Широкий водопровод улитки</li> </ul> <p>Синдром широкого водопровода преддверия</p> <p>Синдром Меньера</p> <p>Узкий водопровод преддверия</p> <p>Опухоли эндолимфатического мешка</p>

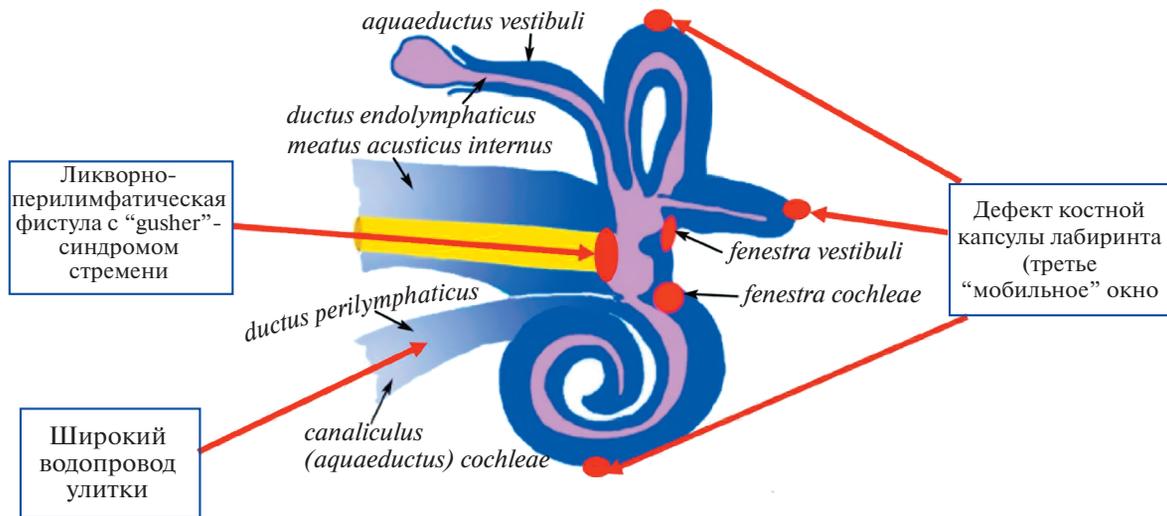
ции стенок костного лабиринта (единичные или множественные): дегисценции полукружных каналов (Minog, 2000; Mikulec et al., 2004), улитки (каротидно-кохлеарная (Neut, 2011), кохлеарно-фациальная (Wackum, 2019), дегисценция верхушки улитки (Kim, 2006), множественные дегисценции костной капсулы лабиринта при систем-

ных заболеваниях, поражающих костную ткань и нарушающих плотность кости (болезнь Педжета (Monsell, 2004), миеломная болезнь (Pogson, 2021)).

Помимо известных ранее, недавно был описан новый анатомический вариант, приводящий к появлению симптомов третьего “мобильного”



**Рис. 1.** Механические препятствия на пути внутриулиткового звукопроведения. Рисунок из книги (Frank H. Netter “Anatomy of the Ear Charts, 1<sup>st</sup> Ed., 1999), с переводом и добавлениями.



**Рис. 2.** Патологические состояния капсулы лабиринта, приводящие к излишнему контакту перилимфатического пространства с окружающими анатомическими структурами.

окна лабиринта, — перепончатая или гипермобильная подножная пластинка стремени, которая может возникнуть после травмы уха и не всегда сопровождается утечкой перилимфы в среднее ухо (Gadre et al., 2020).

Возможно ятрогенное возникновение третьего окна после операций на среднем ухе или при удалении внутриканальной вестибулярной шванномы с попыткой сохранения слуха, приведшей к перелому общей ножки полукружных каналов (stus commune) (Deerp et al., 2021).

К врожденным anomalies развития перилимфатического пространства, приводящим к расширению имеющихся в норме анатомических коммуникаций лабиринта (ликворно-перилимфатические фистулы), относится X-сцепленная тугоухость с “gusher”-синдромом стремени (“X-сцепленный “stapes gusher”). Причиной аномальной коммуникации между перилимфатическим и субарахноидальными пространствами является отсутствие костной стенки (lamina cribrosa), которая отделяет латеральный конец (дно) внутреннего слухового прохода от базального завитка улитки (Snik et al., 1995).

В литературе обсуждается предположение, что ликворно-перилимфатической фистулой может являться широкий и/или чрезмерно проходимый водопровод улитки, обеспечивающий легкий доступ цереброспинальной жидкости в перилимфатическое пространство, однако убедительных доказательств этому пока нет (Jackler, Hwang, 1993; Pogodzinski et al., 2008).

Третья группа включает патологические состояния, нарушающие гомеостаз эндолимфатического пространства вследствие нарушения

циркуляции эндолимфы и/или эндолимфатического гидроста (рис. 3).

Эндолимфатическое пространство лабиринта также относится к проводящей системе внутреннего уха, так как преобразование механических колебаний жидкости в нервные импульсы происходит во внутренних волосковых клетках. Поэтому его патологические состояния также могут проявляться КВИ на ТПА. Врожденные anomalies развития эндолимфатического пространства, приводящие к нарушению циркуляции эндолимфы, — это широкий водопровод преддверия (изолированный или в составе генетических синдромов) и узкий, короткий водопровод преддверия, который достаточно часто встречается на компьютерных томограммах при болезни Меньера.

Широкий (расширенный) водопровод преддверия (ШВП, large, enlarged vestibular aqueduct) — самая частая врожденная anomaly развития внутреннего уха (Bertholon, Karkas, 2016), которая приводит к развитию тугоухости различной степени тяжести и является морфологической основой синдрома широкого водопровода преддверия.

Предполагают, что при расширенном эндолимфатическом протоке происходит рефлюкс эндолимфы в улитковый проток, в то время как нормальным направлением считается ток от улиткового и полукружных протоков к эндолимфатическому мешку. Причинами снижения слуха могут быть нарушение нормального тока жидкости в эндолимфатической системе внутреннего уха, нарушение водно-электролитного и кислотно-щелочного баланса эндолимфы, приводящие к повреждению нейроэпителлия и кохлеовестибулярной дисфункции (Berretrini et al., 2005). Характерной особенностью аудиограмм при ШВП яв-

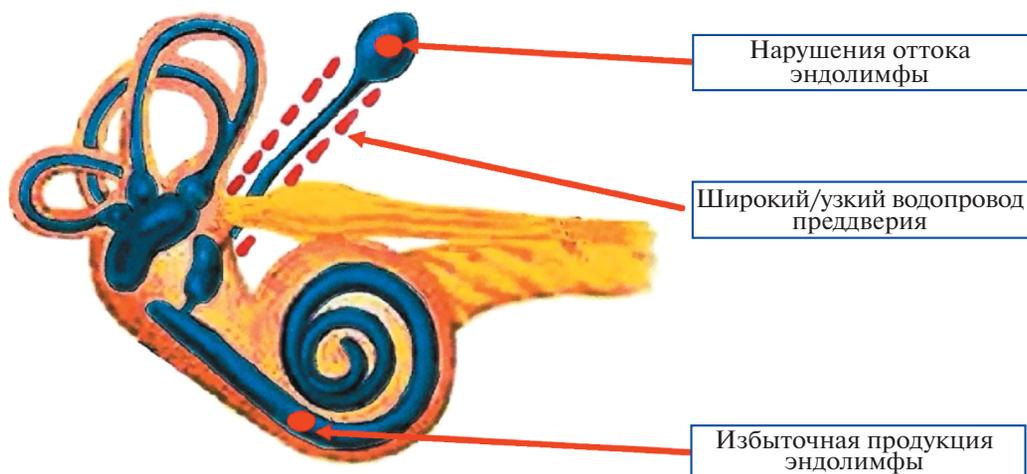


Рис. 3. Патогенетические механизмы нарушения гомеостаза эндолимфатического пространства лабиринта.

ляется наличие КВИ во всем частотном диапазоне или только на низких частотах. По данным авторов работы (Zhou et al., 2008), КВИ при ШВП встречается в 80% случаев.

Приобретенные патологические состояния эндолимфатического пространства приводят к синдрому Меньера вследствие избыточной продукции эндолимфы (как правило, при системных заболеваниях) или нарушения ее оттока – опухоли эндолимфатического мешка (Gioacchini et al., 2022), метастазы опухолей в эндолимфатический мешок (Balili et al., 2014).

Попытки классифицировать нарушения внутрилабиринтного звукопроведения предпринимаются различными авторами, что позволяет лучше понять и систематизировать эту патологию. Выделяют анатомические дискретные (с указанием локализации) и анатомически диффузные (например, при болезни Педжета) (Merchant, Rosowski, 2008); симптомные и бессимптомные, единичные и множественные, односторонние и двусторонние варианты аномалий третьего “мобильного” окна (Reynard et al., 2022).

#### МЕХАНИЗМ ПОЯВЛЕНИЯ КОСТНО-ВОЗДУШНОГО ИНТЕРВАЛА НА ТОНАЛЬНОЙ ПОРОГОВОЙ АУДИОГРАММЕ

Механизм появления КВИ на ТПА при нарушениях внутриулиткового звукопроведения изучен недостаточно. Предполагается, что все эти аномалии могут функционировать как патологические входы для вибрации, снижающие чувствительность рецепторов улитки к воздушно-проведенным звукам и повышающие чувствительность к костно-проведенным звукам, что дает КВИ на ТПА. В литературе встречается название таких

состояний – “гиперакузия к костно-проведенным звукам” (Guan et al., 2020).

Предлагаются различные объяснения функционирования патологических входов для вибрации.

- Нарушение тока внутрилабиринтных жидкостей (механические препятствия в перилимфатическом пространстве, широкий и узкий водопровод преддверия, закрытое круглое окно)

- Повышение чувствительности к изменениям внутричерепного давления (“gusher” – синдром стремени и другие ликворно-перилимфатические фистулы)

- Изменение импеданса структур лабиринта:

- улучшение костно-проведенных звуков путем увеличения разницы в импедансе между окном преддверия и круглым окном во время тестирования порогов костной проводимости, что улучшает пороги костно-проведенных звуков (Merchant et al., 2007);

- увеличение податливости (пропускной способности) системы “среднее-внутреннее ухо” из-за “третьего мобильного окна” – снижение входного импеданса внутреннего уха (Castellucci et al., 2013);

- рассеивание акустической энергии через третье “мобильное” окно (Merchant et al., 2007)

Патология внутреннего уха как причина КВИ на ТПА при аудиологическом обследовании пациента проявляется кондуктивной, сенсоневральной или смешанной тугоухостью со значительным КВИ, чаще всего на низких частотах, и нормальной отоскопической картиной. Тимпанограммы при этой патологии, как правило, типа А по классификации Джергера, однако, возможна междушная разница в высоте пиков тимпанограмм с более высоким пиком на пораженной стороне (Cas-

tellucci et al., 2013). Также возможно получение тимпанограммы типа As при избыточном давлении на овальное окно преддверия со стороны перилимфатического пространства, что позволяет ошибочно диагностировать отосклероз. Могут регистрироваться отоакустическая эмиссия (ОАЭ) и акустические рефлексы (АР) (Merchant, Rosowski, 2008), причем не отмечается корреляции между степенью тугоухости на ТПА и порогом АР. Именно наличие АР и ОАЭ при существенно повышенных порогах слуха и наличии КВИ должно наводить на мысль, что КВИ на ТПА обусловлен аномалией внутреннего уха, а именно третьим “мобильным” окном лабиринта (Zhou et al., 2008).

Важность выявления нарушений внутрилабиринтного звукопроведения обусловлена тем, что все эти состояния по данным аудиологических методов исследования могут напоминать отосклероз, однако хирургическое вмешательство в этом случае не только напрасно и не эффективно, но и потенциально опасно. При попытке операции на стремени возможно фонтанирующее истечение перилимфы, с последующим развитием бактериального менингита, длительного вестибулярного головокружения, мучительного тиннитуса и снижения слуха на оперированном ухе вплоть до глухоты. Также при наличии аномальной коммуникации между цереброспинальным и перилимфатическим пространствами, фонтанирующее истечение перилимфы может быть спровоцировано травмой головы, падением, резким повышением внутричерепного давления. При этом может произойти разрыв мембраны круглого окна улитки или перелом подножной пластинки стремени, влекущие за собой отоликворею, которая без точного определения источника приводит к многочисленным спинномозговым пункциям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На смену эпохам камертональных проб и тональной пороговой аудиометрии в аудиологию пришла эпоха компьютерной томографии височных костей. Это позволило выявить группу патологических состояний внутреннего уха, демонстрирующую КВИ на ТПА, которая может иметь в своей основе нарушение передачи механических колебаний волн жидкостей внутри улитки. Наличие КВИ на ТПА не может считаться маркером локализации патологии в структурах наружного и/или среднего уха. Компьютерная томография (при ее корректной интерпретации) является необходимым методом исследования для диагностики всех слуховых нарушений, независимо от вида тональной пороговой аудиограммы. Применение этого метода в клинической практике позволит пациентам избежать ненужных и опасных

хирургических вмешательств и предотвратит падение слуха до глухоты.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено без какой-либо финансовой поддержки.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной статьи подтверждает отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воячек В.И. *Избранные вопросы военной отоларингологии*. Л.: Изд-во ВМА РККА, 1934. 202 с.
- Воячек В.И. *Основы оториноларингологии*. Медгиз, Ленинградское отделение, 1953. 348 с.
- Капустина Т.А. Специальная классификация смешанных форм нарушений слуха для выбора тактики лечения. *Байкальский медицинский журнал*. 1999. № 1. Т. 16. С. 25–28.
- Куликовский Г.Г. К вопросу о физиологии костной проводимости в связи с вибрационной чувствительностью и ее значение в шумовой профвредности (клиническое и экспериментальное исследование). *Вопросы медицинского обеспечения авиации. Сб. тр. Том 1. Избранные вопросы физиологии органа зрения и ЛОР органов*. М.: Гос. военное изд-во Наркомата оборона Союза ССР, 1939. 232 с.
- Сагалович Б.М. Общая семиотика тугоухости. *Тугоухость*. Под ред. Н.А. Преображенского. М.: Медицина, 1978. 440 с.
- Сагалович Б.М., Пальчун В.Т. *Болезнь Меньера*. М.: Медицинское информационное агентство, 1999. 524 с.
- Темкин Я.С., Лихачев А.Г., Преображенский Б.С. *Болезни уха, горла и носа*. М.: Медгиз, 1947. 374 с.
- Ундриц В.Ф. О болезни Меньера. *Вестник оториноларингологии*. 1958. № 6. С. 57–65.
- Храппо Н.С. Исследование вестибулярной функции. *Руководство по оториноларингологии*. Под ред. И.Б. Солдатов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина, 1997. С. 62–84.
- Balili I., Sullivan S., Mckeever P., Barkan A. Pituitary carcinoma with endolymphatic sac metastasis. *Pituitary*. 2014. V. 7 (3). P. 210–213. <https://doi.org/10.1007/s11102-013-0489-x>
- Bance M. When is a conductive hearing loss not a conductive hearing loss? Causes of a mismatch in air-bone threshold measurements or a “pseudoconductive” hearing loss. *J. Otolaryngol.* 2004. V. 33 (2). P. 135–138. <https://doi.org/10.2310/7070.2004.00135>
- Benson J.C., Diehn F., Passe T., Guerin J., Silvera V.M., Carlson M.L., Lane J. The Forgotten Second Window: A Pictorial Review of Round Window Pathologies. *AJNR. Am. J. Neuroradiol.* 2020. V. 41 (2). P. 192–199. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6356>
- Bertrtrini S., Forli F., Bogazzi F., Neri E., Salvatori L., Casani A.P., Franceschini S.S. Large vestibular aque-

- duct syndrome: audiological, radiological, clinical, and genetic features. *Am. J. Otolaryngol.* 2005. V. 26 (6). P. 363–371.  
<https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2005.02.013>
- Bertholon P., Karkas A. Otologic disorders causing dizziness, including surgery for vestibular disorders. *Handbook of Clinical Neurology*, 2016. V. 137. P. 279–293.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00020-0>
- Bezold F., Siebenmann F. *Text-book of Otolology for Physicians and Students in 32 Lectures, translated by J. Holinger, M.D.* Chicago. Colegrove, 1908. 349 p.
- Castellucci A., Brandolini C., Modugno G.C. Tympanometric findings in superior semicircular canal degiscence syndrome. *Acta Otorhinolaryngol Ital.* 2013. V. 33 (2). P. 112–120.
- Coles P. External meatus closure by audiometer earphones. *Journal of Speech and Hearing Disorders.* 1967. V. 32. P. 296–297.
- Deep N.L., Kay-Rivest E., Jr J. T.R. Iatrogenic Third Window After Retrosigmoid Approach to a Vestibular Schwannoma Managed with Cochlear Implantation. *Otol. Neurotol.* 2021. V. 42 (9). P. 1355–1359.  
<https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000003267>
- Gadre A.K., Edwards I.R., Baker V.M., Roof C.R. Membranous or Hypermobile Stapes Footplate: A New Anatomic Site Resulting in Third Window Syndrome. *Front Neurol.* 2020. V. 11. P. 861–871.  
<https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00871>
- Gioacchini F.M., Kaleci S., Chiarella G., Viola P., Pisani D., Scarpa A., Tulli M., Pace A., Iannella G., Re M. Symptoms and clinical features in patients affected by endolymphatic sac tumor: a systematic review and meta-analysis. *Eur Arch. Otorhinolaryngol.* 2022. V. 279 (11). P. 5081–5088.  
<https://doi.org/10.1007/s00405-022-07469-6>
- Glasscock M., Shambaugh G., Johnson D. *Surgery of the Ear.* Philadelphia. Saunders, 1990. 656 p.
- Guan X., Cheng Y.S., Galaiya D.J., Rosowski J.J., Lee D.J., Nakajima H.H. Bone-conduction hyperacusis induced by superior canal dehiscence in human: the underlying mechanism. *Sci Rep.* 2020. V. 10 (1). P. 16564.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-73565-4>
- Jackler R.K., Hwang P.H. Enlargement of the cochlear aqueduct: fact or fiction? *Otolaryngol Head Neck Surg.* 1993. V. 109 (1). P. 14–25.  
<https://doi.org/10.1177/019459989310900104>
- Kim H.H.S., Wilson D.F. A third mobile window at the cochlear apex. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2006. V. 135 (6). P. 965–966.  
<https://doi.org/10.1016/j.otohns.2005.04.006>
- Margolis R.H., Eikelboom R.H., Johnson C., Ginter S.M., Swanepoel De W., Moore B.C.J. False air-bone gaps at 4 kHz in listeners with normal hearing and sensorineural hearing loss. *Int. J. Audiol.* 2013. V. 52 (8). P. 526–532.  
<https://doi.org/10.3109/14992027.2013.792437>
- Martin C., Tringali S., Bertholon P., Pouget J.-F., Prades J.-M. Isolated congenital round window absence. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2002. V. 111 (9). P. 799–801.  
<https://doi.org/10.1177/000348940211100907>
- Merchant S.N., Nakajima H.H., Halpin C., Nadol J.B.Jr, Lee D.J., Innis W.P., Curtin H., Rosowski J.J. Clinical investigation and mechanism of air-bone gaps in large vestibular aqueduct syndrome. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2007. V. 116 (7). P. 532–541.  
<https://doi.org/10.1177/000348940711600709>
- Merchant S.N., Rosowski J.J. Conductive hearing loss caused by third-window lesions of the inner ear. *Otol Neurotol.* 2008. V. 29 (3). P. 282–289.  
<https://doi.org/10.1097/mao.0b013e318161ab24>
- Mikulec A.A., McKenna M.J., Ramsey M.J., Rosowski J.J., Herrmann B.S., Rauch S.D., Curtin H.D., Merchant S.N. Superior semicircular canal dehiscence presenting as conductive hearing loss without vertigo. *Otol Neurotol.* 2004. V. 25 (2). P. 121–129.  
<https://doi.org/10.1097/00129492-200403000-00007>
- Minor LB. Superior canal dehiscence syndrome. *Am. J. Otol.* 2000. V. 21. P. 9–19.
- Monsell E.M. The mechanism of hearing loss in Paget's disease of bone. *Laryngoscope.* 2004. V. 114 (4). P. 598–606.  
<https://doi.org/10.1097/00005537-200404000-00002>
- Neyt P., Govaere F., Forton G.E.J. Simultaneous true stapes fixation and bilateral bony dehiscence between the internal carotid artery and the apex of the cochlea: the ultimate pitfall. *Otol Neurotol.* 2011. V. 32 (6). P. 909–913.  
<https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e318225573f>
- Nober E.H. Vibrotactile sensitivity of deaf children to high intensity sound. *Laryngoscope.* 1967. V. 77 (12). P. 2128–2146.  
<https://doi.org/10.1288/00005537-196712000-00005>
- Nober E.H. Cutile air and bone conduction thresholds of the deaf. *Exceptional Child.* 1970. V. 36 (8). P. 571–579.
- Parving A., Bak-Pedersen K. Clinical findings and diagnostic problems in sensorineural low frequency hearing loss. *Acta Otolaryngol.* 1978. V. 85 (3–4). P. 184–190.  
<https://doi.org/10.3109/00016487809111925>
- Pogodzinski M.S., Shallop J.K., Sprung J., Weingarten T.N., Wong G.Y., McDonald T.J. Hearing loss and cerebrospinal fluid pressure: case report and review of the literature. *Ear Nose Throat J.* 2008. V. 87 (3). P. 144–147.
- Pogson J.M., Taylor R.L., Thompson E.O., Magnussen J.S., Welgampola M.S., Halmagyi G.M. A Window Into the Whole Story: Temporal Bone Plasmacytoma Presenting With a Mobile Third Window. *Laryngoscope.* 2021. V. 131 (3). P. 966–969.  
<https://doi.org/10.1002/lary.28951>
- Politzer A. *Geschichte der Ohrenheilkunde. Zwei Band.* Von 1850–1911. Verlag von Ferdinand Enke. Stuttgart, 1913. 570 p.
- Reda J.D., West N., Cayé-Thomasen P. Intracochlear Vestibular Schwannoma Presenting with Mixed Hearing Loss. *J. Int. Adv. Otol.* 2021. V. 17 (3). P. 265–268.  
<https://doi.org/10.5152/iao.2021.8586>
- Reynard P., Idriss S., Ltaief-Boudrigua A., Bertholon P., Pirvan A., Truy E., Thai-Van H., Ionescu E.C. Proposal for a Unitary Anatomic-Clinical and Radiological Classification of Third Mobile Window Abnormalities. *Front Neurol.* 2022. V. 12. P. 792545.  
<https://doi.org/10.3389/fneur.2021.792545>
- Rinne F.H.A. Beiträge zur Physiologie des menschlichen Ohres. *Vierteljahrsschrift für die praktische Heilkunde.* Prague. 1855. V. 45. P. 71–123.

- Ross M., Tucker C.A. A case study of collapse of the ear canal during audiometry. *Laryngoscope*. 1965. V. 75. P. 65–67.  
<https://doi.org/10.1288/00005537-196501000-00008>
- Rudmin F. False air-bone gap. *Ear Hear*. 1983. V. 4 (2). P. 106–107.  
<https://doi.org/10.1097/00003446-198303000-00009>
- Snik A.F., Hombergen G.C., Mylanus E.A., Cremers C.W. Air-bone gap in patients with X-linked stapes gusher syndrome. *Am. J. Otol*. 1995. V. 16(2). P. 241–246.
- Tonndorf J. Sensorineural and pseudosensorineural hearing losses. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 1988. V. 50 (2). P. 79–83.  
<https://doi.org/10.1159/000275974>
- Valsalva A.M. *De aure humana tractatus*. Bononie, 1704. 228 p.
- Wackym P.A., Balaban C.D., Zhang P., Siker D.A., Hundal J.S. Third Window Syndrome: Surgical Management of Cochlea-Facial Nerve Dehiscence. *Front Neurol*. 2019. V. 10. P. 1281.  
<https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01281>
- Wong W.K., Salkeld L., Flint D. Isolated Congenital Round Window Atresia: Report of 2 Cases. *Ear Nose Throat J*. 2020. V. 99 (7). P. 433–436.  
<https://doi.org/10.1177/0145561319840541>
- Zhou G., Gopen Q., Kenna M.A. Delineating the hearing loss in children with enlarged vestibular aqueduct. *Laryngoscope*. 2008. V. 118 (11). P. 2062–2066.  
<https://doi.org/10.1097/MLG.0b013e31818208ad>

## Development of methodological approaches to assess the functional state of the inner ear labyrinth

L. V. Toropchina<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> *FBSEI APE Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of Russia 125993 Moscow, st. Barrikadnaya, 2/1, building 1, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: liyatoropchina@yandex.ru*

Modeling the propagation of sound vibrations from the foot plate of the stirrup in the oval window to the perceiving formations of the organ of Corti is a difficult experimental problem. In the search for the causes of hearing loss, tone threshold audiometry has traditionally been considered as the basis of diagnosis. The presence of an air-bone gap on an audiogram was associated with a dysfunction of the middle ear; however, in many cases, an air-bone gap is detected when the pathology is localized in the structures of the inner ear. The review shows that pathological conditions that impair intracochlear sound conduction are successfully detected using computed tomography of the temporal bones. The classification of pathological conditions of the labyrinth, giving the bone-air gap on the tone threshold audiogram, was performed.

*Key words:* conductive hearing loss, sensorineural hearing loss, mixed hearing loss, sound conduction, sound perception, intracochlear sound conduction, air-bone gap, tone threshold audiometry, malformations of the inner ear, computed tomography of the temporal bones

### REFERENCES

- Voyachek V.I. *Izbrannye voprosy voennoj otolaringologii* [Selected issues of military otolaryngology]. Leningrad. Ed. VMA RKKA, 1934. 202 p. (in Russian).
- Voyachek V.I. *Osnovy oto-rino-laringologii* [Fundamentals of oto-rhino-laryngology]. Medgiz, Leningrad branch, 1953. 348 p. (in Russian).
- Kapustina T.A. *Special'naja klassifikacija smeshannyh form narushenij sluha dlja vybora taktiki lechenija* [Special classification of mixed forms of hearing impairment for the choice of treatment tactics]. *Baikal Medical Journal*. 1999. No. 1. T. 16. P. 25–28 (in Russian).
- Kulikovskiy G.G. *K voprosu o fiziologii kostnoj provodimosti v svyazi s vibracionnoj chuvstvitel'nost'ju i ee znachenie v shumovoj profyrednosti (klinicheskoe i jeksperimental'noe issledovanie)* [On the question of the physiology of bone conduction in connection with vibration sensitivity and its significance in noise occupational hazard (clinical and experimental study)]. *Voprosy medicinskogo obespechenija aviatsii. Sbornik trudov. Tom 1. Izbrannye voprosy fiziologii organa zrenenija i LOR organov* [Issues of medical support for aviation. Collection of works. Volume 1. Selected questions of the physiology of the organ of vision and ENT organs]. M., State Military Publishing House of the People's Commissariat for Defense of the USSR, 1939. 232 p. (in Russian).
- Sagalovich B.M. *Obshhaja semiotika tugouhosti* [General semiotics of hearing loss]. *Tugouhost'. Pod red. Preobrazhenskogo N.A.* [Hearing loss. Ed. Preobrazhensky N.A.]. M.: Medicine, 1978. 440 p. (in Russian).
- Sagalovich B.M., Palchun V.T. *Bolezn' Men'era* [Meniere's disease]. M.: Medical Information Agency, 1999. 524 p. (in Russian).
- Temkin Ya.S., Likhachev A.G., Preobrazhensky B.S. *Bolezni uha, gorla i nosa* [Diseases of the ear, throat and nose]. M.: Medgiz, 1947. 374 p. (in Russian).
- Undrits V.F. *O bolezni Men'era* [About Meniere's disease]. *Vestnik Oto-Rino-Laringologii* [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 1958. No. 6. P. 57–65 (in Russian).
- Khrappo N.S. *Issledovanie vestibuljarnoj funkicii* [Study of vestibular function]. *Rukovodstvo po otorinolaringologii. Pod red. I.B. Soldatova. 2-e izd.* [Guide to otorhinolaryngology. Ed. I.B. Soldatov. 2nd ed.]. M.: Medicine, 1997. P. 62–84 (in Russian).

- Balili I., Sullivan S., Mckeever P., Barkan A. Pituitary carcinoma with endolymphatic sac metastasis. *Pituitary*. 2014. V. 17 (3). P. 210–213.  
<https://doi.org/10.1007/s11102-013-0489-x>
- Bance M. When is a conductive hearing loss not a conductive hearing loss? Causes of a mismatch in air-bone threshold measurements or a “pseudoconductive” hearing loss. *J. Otolaryngol.* 2004. V. 33 (2). P. 135–138.  
<https://doi.org/10.2310/7070.2004.00135>
- Benson J.C., Diehn F., Passe T., Guerin J., Silvera V.M., Carlson M.L., Lane J. The Forgotten Second Window: A Pictorial Review of Round Window Pathologies. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2020. V. 41 (2). P. 192–199.  
<https://doi.org/10.3174/ajnr.A6356>
- Berretrini S., Forli F., Bogazzi F., Neri E., Salvatori L., Casani A.P., Franceschini S.S. Large vestibular aqueduct syndrome: audiological, radiological, clinical, and genetic features. *Am J Otolaryngol.* 2005. V. 26 (6). P. 363–371.  
<https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2005.02.013>
- Bertholon P., Karkas A. Otolitic disorders causing dizziness, including surgery for vestibular disorders. *Handbook of Clinical Neurology*, 2016. V. 137. P. 279–293.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00020-0>
- Bezold F., Siebenmann F. *Text-book of Otolology for Physicians and Students in 32 Lectures, translated by J. Hollinger, M.D.* Chicago. Colegrove, 1908. 349 p.
- Castellucci A., Brandolini C., Modugno G.C. Tympanometric findings in superior semicircular canal degiscence syndrome. *Acta Otorhinolaryngol Ital.* 2013. V. 33 (2). P. 112–120.
- Coles P. External meatus closure by audiometer earphones. *Journal of Speech and Hearing Disorders.* 1967. V. 32. P. 296–297.
- Deep N.L., Kay-Rivest E., Jr J. T.R. Iatrogenic Third Window After Retrosigmoid Approach to a Vestibular Schwannoma Managed with Cochlear Implantation. *Otol Neurotol.* 2021. V. 42 (9). P. 1355–1359.  
<https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003267>
- Gadre A.K., Edwards I.R., Baker V.M., Roof C.R. Membranous or Hypermobile Stapes Footplate: A New Anatomic Site Resulting in Third Window Syndrome. *Front Neurol.* 2020. V. 11. Art. 871.  
<https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00871>
- Gioacchini F.M., Kaleci S., Chiarella G., Viola P., Pisani D., Scarpa A., Tulli M., Pace A., Iannella G., Re M. Symptoms and clinical features in patients affected by endolymphatic sac tumor: a systematic review and meta-analysis. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2022. V. 279 (11). P. 5081–5088.  
<https://doi.org/10.1007/s00405-022-07469-6>
- Glasscock M., Shambaugh G., Johnson D. *Surgery of the Ear.* Philadelphia. Saunders, 1990. 656 p.
- Guan X., Cheng Y.S., Galaiya D.J., Rosowski J.J., Lee D.J., Nakajima H.H. Bone-conduction hyperacusis induced by superior canal dehiscence in human: the underlying mechanism. *Sci Rep.* 2020. V. 10 (1). P. 16564.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-73565-4>
- Jackler R.K., Hwang P.H. Enlargement of the cochlear aqueduct: fact or fiction? *Otolaryngol Head Neck Surg.* 1993. V. 109 (1). P. 14–25.  
<https://doi.org/10.1177/019459989310900104>
- Kim H.H.S., Wilson D.F. A third mobile window at the cochlear apex. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2006. V. 135 (6). P. 965–966.  
<https://doi.org/10.1016/j.otohns.2005.04.006>
- Margolis R.H., Eikelboom R.H., Johnson C., Ginter S.M., Swanepoel De W., Moore B.C.J. False air-bone gaps at 4 kHz in listeners with normal hearing and sensorineural hearing loss. *Int. J. Audiol.* 2013. V. 52 (8). P. 526–532.  
<https://doi.org/10.3109/14992027.2013.792437>
- Martin C., Tringali S., Bertholon P., Pouget J.-F., Prades J.-M. Isolated congenital round window absence. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2002. V. 111 (9). P. 799–801.  
<https://doi.org/10.1177/000348940211100907>
- Merchant S.N., Nakajima H.H., Halpin C., Nadol J.B. Jr, Lee D.J., Innis W.P., Curtin H., Rosowski J.J. Clinical investigation and mechanism of air-bone gaps in large vestibular aqueduct syndrome. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2007. V. 116 (7). P. 532–541.  
<https://doi.org/10.1177/000348940711600709>
- Merchant S.N., Rosowski J.J. Conductive hearing loss caused by third-window lesions of the inner ear. *Otol. Neurotol.* 2008. V. 29 (3). P. 282–289.  
<https://doi.org/10.1097/mao.0b013e318161ab24>
- Mikulec A.A., McKenna M.J., Ramsey M.J., Rosowski J.J., Herrmann B.S., Rauch S.D., Curtin H.D., Merchant S.N. Superior semicircular canal dehiscence presenting as conductive hearing loss without vertigo. *Otol. Neurotol.* 2004. V. 25 (2). P. 121–129.  
<https://doi.org/10.1097/00129492-200403000-00007>
- Minor LB. Superior canal dehiscence syndrome. *Am. J. Otol.* 2000. V. 21. P. 9–19.
- Monsell E.M. The mechanism of hearing loss in Paget’s disease of bone. *Laryngoscope.* 2004. V. 114 (4). P. 598–606.  
<https://doi.org/10.1097/00005537-200404000-00002>
- Neyt P., Govaere F., Forton G.E.J. Simultaneous true stapes fixation and bilateral bony dehiscence between the internal carotid artery and the apex of the cochlea: the ultimate pitfall. *Otol. Neurotol.* 2011. V. 32 (6). P. 909–913.  
<https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e318225573f>
- Nober E.H. Vibrotactile sensitivity of deaf children to high intensity sound. *Laryngoscope.* 1967. V. 77 (12). P. 2128–2146.  
<https://doi.org/10.1288/00005537-196712000-00005>
- Nober E.H. Cutile air and bone conduction thresholds of the deaf. *Exceptional Child.* 1970. V. 36 (8). P. 571–579.
- Parving A., Bak-Pedersen K. Clinical findings and diagnostic problems in sensorineural low frequency hearing loss. *Acta Otolaryngol.* 1978. V. 85 (3–4). P. 184–190.  
<https://doi.org/10.3109/00016487809111925>
- Pogodzinski M.S., Shallop J.K., Sprung J., Weingarten T.N., Wong G.Y., McDonald T.J. Hearing loss and cerebrospinal fluid pressure: case report and review of the literature. *Ear. Nose. Throat J.* 2008. V. 87 (3). P. 144–147.
- Pogson J.M., Taylor R.L., Thompson E.O., Magnussen J.S., Welgampola M.S., Halmagyi G.M. A Window Into the Whole Story: Temporal Bone Plasmacytoma Presenting With a Mobile Third Window. *Laryngoscope.* 2021. V. 131 (3). E966–969.  
<https://doi.org/10.1002/lary.28951>

- Politzer A. *Geschichte der Ohrenheilkunde. Zwei Band.* Von 1850–1911. Verlag von Ferdinand Enke. Stuttgart, 1913. 570 p.
- Reda J.D., West N., Cayé-Thomasen P. Intracochlear Vestibular Schwannoma Presenting with Mixed Hearing Loss. *J. Int. Adv. Otol.* 2021. V. 17 (3). P. 265–268. <https://doi.org/10.5152/iao.2021.8586>
- Reynard P., Idriss S., Ltaief-Boudrigou A., Bertholon P., Pirvan A., Truy E., Thai-Van H., Ionescu E.C. Proposal for a Unitary Anatomic-Clinical and Radiological Classification of Third Mobile Window Abnormalities. *Front Neurol.* 2022. V. 12. Art. 792545. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.792545>
- Rinne F.H.A. Beiträge zur Physiologie des menschlichen Ohres. *Vierteljahrsschrift für die praktische Heilkunde.* Prague. 1855. V. 45. P. 71–123.
- Ross M., Tucker C.A. A case study of collapse of the ear canal during audiometry. *Laryngoscope.* 1965. V. 75. P. 65–67. <https://doi.org/10.1288/00005537-196501000-00008>
- Rudmin F. False air-bone gap. *Ear Hear.* 1983. V. 4 (2). P. 106–107. <https://doi.org/10.1097/00003446-198303000-00009>
- Snik A.F., Hombergen G.C., Mylanus E.A., Cremers C.W. Air-bone gap in patients with X-linked stapes gusher syndrome. *Am. J. Otol.* 1995. V. 16 (2). P. 241–246.
- Tonndorf J. Sensorineural and pseudosensorineural hearing losses. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec.* 1988. V. 50 (2). P. 79–83. <https://doi.org/10.1159/000275974>
- Valsalva A.M. *De aure humana tractatus.* Bononie, 1704. 228 p.
- Wackym P.A., Balaban C.D., Zhang P., Siker D. A., Hundal J.S. Third Window Syndrome: Surgical Management of Cochlea-Facial Nerve Dehiscence. *Front Neurol.* 2019. V. 10. Art. 1281. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01281>
- Wong W.K., Salkeld L., Flint D. Isolated Congenital Round Window Atresia: Report of 2 Cases. *Ear Nose Throat J.* 2020. V. 99 (7). P. 433–436. <https://doi.org/10.1177/0145561319840541>
- Zhou G., Gopen Q., Kenna M.A. Delineating the hearing loss in children with enlarged vestibular aqueduct. *Laryngoscope.* 2008. V. 118 (11). P. 2062–2066. <https://doi.org/10.1097/MLG.0b013e31818208ad>

## ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ГОЛОСОВОЙ КОНКУРЕНЦИИ В НОРМЕ И ПРИ НАРУШЕНИЯХ СЛУХОРЕЧЕВОЙ ФУНКЦИИ

© 2023 г. А. А. Балякова<sup>1</sup>, О. В. Лабутина<sup>1</sup>, И. С. Медведев<sup>1</sup>, С. П. Пак<sup>1</sup>, Е. А. Огородникова<sup>1,\*</sup>

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

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

\*E-mail: ogorodnikovaea@infran.ru

Поступила в редакцию 05.09.2023 г.

После доработки 18.09.2023 г.

Принята к публикации 25.09.2023 г.

Исследовали особенности восприятия речевых сигналов в условиях голосовой конкуренции по гендерному признаку (мужской/женский голос) у испытуемых разного возраста и состояния слухоречевой функции. Психофизические измерения проводили при имитации ситуации “речевого коктейля” путем одновременного произнесения разных слов диктором-мужчиной и диктором-женщиной. Средняя частота основного тона голоса (ЧОТ) у диктора-мужчины составляла  $108 \pm 5.92$  Гц, у диктора-женщины –  $185 \pm 12.03$  Гц. Оба диктора являлись нормативными носителями русского языка. Цифровые реализации записей выравнивали по интенсивности и микшировали, чтобы суммарный тестовый стимул представлял собой смесь слов, произнесенных мужским (М) и женским (Ж) голосом, с синхронизацией времени начала их звучания. Тестовые речевые сигналы предъявляли через наушники или через динамик, расположенный перед аудитором на расстоянии 50 см. Сравнивали показатели времени реакции и числа правильных распознаваний слов целевого диктора (М или Ж) у четырех групп испытуемых разного возраста и слухоречевого статуса: взрослые испытуемые с нормой слуха и речи ( $n = 35$ ) и с нарушениями слуха ( $n = 26$ ); школьники с нормотипичным развитием ( $n = 26$ ) и с нарушениями речи ( $n = 25$ ). Результаты свидетельствовали об ухудшении способности выделять целевые речевые потоки в условиях голосовой конкуренции при нарушениях слуха и речи, включенных в сравнительное исследование. У испытуемых с тугоухостью и с речевыми проблемами выявлены различия в восприятии мужского и женского голоса, которые могут иметь биологическую и социальную основу. Результаты имеют практическое значение для развития системы слухоречевых тренировок и современных технологий слухопротезирования.

**Ключевые слова:** голосовая конкуренция, распознавание речевых сигналов, речевой коктейль, гендерные различия голоса, тугоухость, нарушения речи, слухоречевая тренировка

DOI: 10.31857/S0235009223040029, EDN: QNREOL

### ВВЕДЕНИЕ

Слуховое восприятие речи характеризуется определенной степенью помехоустойчивости и избирательности, что позволяет человеку обнаруживать и выделять целевого диктора на фоне акустических помех и звучания других источников звуков и речи. Эти свойства слуха играют важную роль в речевом общении в разных условиях коммуникации и обеспечивают человеку возможность сосредоточиться на одном говорящем, игнорируя других собеседников и окружающие шумы. Задачу, решаемую слуховой системой в подобной ситуации, принято обозначать как “проблему вечеринки” или “the cocktail-party problem” (Cherry, 1953). За десятилетия ее исследования, помимо изучения пространственной избирательности ре-

чезового слуха (Bronkhost, 2015; Andreeva, 2018), в психоакустике сформировалось направление “слухового анализа сцен”, ориентированное на изучение механизмов разделения и объединения (перцептивной группировки) звуковых и речевых потоков в сложной акустической среде (Bregman, 1990).

Результаты экспериментальных исследований показали, что значимыми параметрами для реализации процессов слухового анализа в сложных условиях с пространственной составляющей являются: степень близости спектрально-временных характеристик звуковых или речевых источников, синхронность их работы, разделение в пространстве (Bregman, 1990; Shamma et al., 2011; Gutschalk, Dykstra, 2014; Bronkhost, 2015; Andree-

ва, 2018). Помимо эффектов пространственного освобождения от маскировки, обусловленных бинауральными механизмами восприятия, можно отметить и свойства самого речевого сигнала, способствующие решению проблемы “вечеринки”. В первую очередь это относится к концентрации энергии речевого сигнала в ограниченных спектральных областях и к его избыточности, позволяющей перцептивно “восстанавливать” недостающие или замаскированные элементы речевого потока (Kalikow et al., 1977; Moore, 2012; Fogerty et al., 2015).

В сценах с отсутствием значимой пространственной составляющей перцептивная группировка речевого потока в большей степени определяется гендерными и индивидуальными характеристиками голоса диктора (частота основного тона, тембр). Определенный вклад вносит фоновая связность, особенности произношения, контекст речевого сообщения, а также когнитивные факторы, в частности, селективное или избирательное внимание (Shamma et al., 2011; Moore, 2012; Gutschalk, Dykstra, 2014; Popper, Fay, 2015). В практическом плане исследование процессов восприятия в сложной акустической среде имеет важное значение для повышения эффективности реабилитации людей с нарушениями слухоречевой функции и для развития технических средств слухопротезирования.

Цель настоящей работы – сравнительная оценка показателей восприятия целевого речевого сигнала в условиях голосовой конкуренции испытуемыми разного возраста с нормой и нарушениями слуха и речи.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования использовали методику имитации сложной коммуникативной сцены без пространственной составляющей (Огородникова и др., 2022). Стимуляция соответствовала упрощенной схеме “речевого коктейля” – одновременное произнесение разных речевых сигналов (изолированных слов) двумя дикторами – мужчиной и женщиной. Оба диктора являлись нормативными носителями русского языка. Средняя частота основного тона (ЧОТ) для мужского голоса составляла  $108 \pm 5.92$  Гц, для женского –  $185 \pm 12.03$  Гц. Цифровые реализации записей выравнивали по интенсивности и микшировали таким образом, чтобы суммарный тестовый стимул представлял собой смесь слов, произнесенных мужским (М) и женским (Ж) голосом, с синхронизацией времени начала их звучания. Всего использовали шесть пар слов: /Ягода + Армия/, /Борода + Барабан/, /Воробей + Береза/, /Бумага + Дерево/, /Диваны + Лимоны/, /Ягода + Выгода/, в которых прямым шрифтом отме-

чены слова диктора-мужчины, курсивом – слова диктора-женщины.

Тестовые речевые сигналы предъявляли через наушники или через динамик, расположенный перед аудитором на расстоянии 50 см. Условия обеспечивали голосовую конкуренцию и процедуру селективного выделения целевых слов по гендерному признаку “женский/мужской голос”. Оценивали количество правильных распознаваний и время реакции испытуемых. Эксперименты проводили при комфортном уровне стимуляции при помощи комплекса “Учись слушать”, разработанного специалистами Института физиологии им. И.П. Павлова РАН и Санкт-Петербургского Института уха, горла, носа и речи Минздрава РФ (Королева и др., 2013).

В экспериментах участвовали четыре группы испытуемых: взрослые испытуемые в возрасте от 18 до 25 лет с нормальной слухоречевой функцией ( $n = 35$ ) и нарушениями слуха (третья степень сенсоневральной тугоухости, реабилитация после кохлеарной имплантации,  $n = 26$ ); школьники в возрасте 10–14 лет с нормотипичным развитием ( $n = 26$ ) и с нарушениями речи – общее недоразвитие речи (ОНР), проявления дислексии, дисграфии ( $n = 25$ ). Все процедуры, выполненные в исследовании с участием испытуемых, соответствовали требованиям Этического комитета Института физиологии им. И.П. Павлова РАН и Хельсинкской декларации 1964 г. с ее последующими изменениями.

При статистической обработке результатов использовали  $t$ -критерий Стьюдента для несвязанных выборок с проверкой распределения на нормальность по тесту Андерсон-Дарлинга и непараметрический критерий Вилкоксона для зависимых выборок.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные показали, что успешное выделение и распознавание целевых слов при голосовой конкуренции наблюдаются у взрослых аудиторов и у школьников с нормой слуха и речи, у которых средний уровень правильных распознаваний целевых слов, произнесенных мужским или женским голосом, превышает уровень надежного распознавания в 75% от предъявляемых сигналов. В этих группах зафиксированы и наиболее низкие показатели времени реакции, в среднем не превышающие 3 с (табл. 1).

Наибольшие трудности при выполнении задания испытывали люди с нарушениями слуха. В первую очередь это относилось к долингвальным пациентам после кохлеарной имплантации ( $n = 10$ ), которые находились на первом этапе слухоречевой реабилитации. Их показатели в боль-

**Таблица 1.** Средние показатели распознавания и времени реакции при восприятии конкурирующих речевых сигналов в группах сравнения ( $M \pm m$ )

Группы сравнения	Взрослые испытуемые		Группы сравнения	Школьники	
	<i>N</i> (%)	<i>T</i> реакции (с)		<i>N</i> (%)	<i>T</i> реакции (с)
Норма слуха	93.4 ± 1.1	2.5 ± 0.1	Нормотипичное развитие	86.9 ± 1.7	2.9 ± 0.2
Нарушения слуха	52.2 ± 2.9***	4.9 ± 0.2***	Нарушения речи	69.1 ± 2.4***	3.3 ± 0.3**

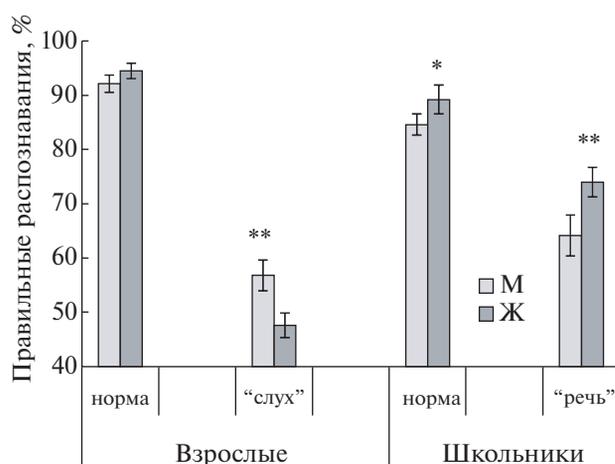
*Примечание:* *N* – количество правильных распознаваний целевых слов (в %); \*\*\*, \*\* – 0.001 и 0.05 уровни значимости различий относительно данных соответствующих групп нормы (*t*-критерий Стьюдента для несвязанных выборок).

шинстве случаев были ниже 50% правильных ответов и составили в среднем  $44.9 \pm 3.4\%$  (распознавание) и  $5.4 \pm 0.2$  с (время реакции). Не достигли уровня надежного распознавания и школьники с нарушениями речи. У них наблюдался разброс индивидуальных данных, а средние показатели времени реакции превышали соответствующие значения и у взрослых, и школьников с нормой слухоречевой функции. Таким образом, у испытуемых разного возраста, имеющих нарушения слуха или речи, в условиях голосовой конкуренции обнаружены значимые отличия в восприятии целевых речевых сигналов относительно показателей нормы в соответствующих группах сравнения (норма слуха и нормотипичное развитие). Помимо тугоухости, такой результат, особенно у испытуемых с кохлеарными имплантами и с нарушениями речи, может быть обусловлен недостаточной сформированностью процессов центрального слухового анализа, ответственных за перцептивную группировку речевых потоков на основе характеристик голоса диктора (Королева и др., 2017). Причиной может выступать исходный дефицит сенсорного опыта (долингвальная глухота, начальный этап реабилитации после операции имплантации, степень тугоухости) и проявления центральных слуховых расстройств (Королева и др., 2017; Бобошко и др., 2014; Musiek, Chermak, 2014; Королева, 2022).

В группах сравнения наблюдались также различия, связанные с гендерными характеристиками голоса. Они были более выражены у испытуемых с нарушениями слуха и речи, но проявились и у школьников с нормотипичным развитием (рис. 1).

Видно, что дети с нормой и нарушением речи достоверно лучше ( $p < 0.01$  по критерию Вилкоксона) распознают речевые цели, произнесенные женским голосом. При этом испытуемые со слуховыми проблемами, наоборот, значимо лучше выделяют слова диктора-мужчины ( $p < 0.01$  по критерию Вилкоксона). Можно предположить, что эти различия имеют как биологическую, так и социальную основу. У испытуемых с пониженным слухом или долингвальной глухотой, предшествующей кохлеарной имплантации, так могут

проявляться особенности перцептивного опыта, сформированного с опорой на остаточный слух в области низких частот. Это может способствовать более успешному распознаванию слов диктора-мужчины с более низкой ЧОТ и высотой голоса. У школьников с нормой слуха различия в отношении гендерных характеристик голоса могут определяться особенностями коммуникативного взаимодействия в период раннего детства, которое реализуется преимущественно в диадах “мать и дитя” (Гайкова, Ляко, 2011). Косвенным подтверждением этому служат реакции на голос матери, которые фиксируются при исследовании психосоматических процессов и используются в клинической практике (Еркудов и др., 2019; Efenđi et al., 2018). Помимо биологических связей, перцептивное усиление женского голоса может определяться преобладанием воспитателей и педагогов женского пола в дошкольных и школьных образовательных учреждениях (Гриненко, 2014), особенно среди специалистов, занимающихся



**Рис. 1.** Показатели правильных распознаваний целевых слов, произнесенных мужским (М) и женским (Ж) голосом.

По горизонтали – условные обозначения групп испытуемых. По вертикали – число правильных распознаваний (в %). Обозначения \* и \*\* отражают уровни значимости различий  $p < 0.05$  и  $p < 0.01$  по критерию Вилкоксона (с учетом нулевых сдвигов).

коррекционной работой. Влияние этих факторов проявляется и в группе школьников с нормотипичным развитием, где в результатах распознавания также наблюдается некоторый “перевес” женского голоса ( $p < 0.05$  по критерию Вилкоксона). При этом, как следует из данных взрослых испытуемых в группе нормы, он постепенно нивелируется с возрастом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом результаты измерений в условиях голосовой конкуренции свидетельствуют об ухудшении способности выделять целевые речевые потоки и распознавать речь в сложной акустической среде при нарушениях слухоречевой функции, как со стороны слухового восприятия, так и при проблемах в развитии речи. Такое ухудшение определяется недостаточной сформированностью центральных механизмов слухового анализа сложных акустических сцен при недостатке сенсорного опыта. Прохождение курса слухоречевых тренировок может существенно улучшить эту ситуацию, что в первую очередь относится к пациентам после кохлеарной имплантации на начальных стадиях реабилитации (Огородникова и др., 2017; Королева, 2022). У школьников с речевыми нарушениями низкие показатели распознавания в условиях конкуренции также могут отражать проблемы с центральной обработкой акустической информации, что хорошо согласуется с данными более раннего исследования процессов слухового сегментного анализа у детей с нарушениями речи, чтения и письма (Огородникова и др., 2012).

Результаты имеют практическое значение для развития системы слухоречевых тренировок и современных технологий слухопротезирования. Они подтверждают целесообразность включения упражнений по восприятию речевых сигналов в условиях голосовой конкуренции в программы перцептивного тренинга. При подготовке таких программ следует учитывать новые данные о различиях в восприятии гендерных особенностей голоса, которые связаны с возрастом и характером нарушений слухоречевой функции. Это касается, в частности, использования расширенных баз “голосов дикторов” и записей речевого материала (слова, слоги, короткие фразы и многое другое).

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (тема № АААА-А18-118050790159-4).

Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику СПбНИИЛОР профессору И.В. Королевой и учителю-дефектологу ГБОУ Школы № 10 Калининского района г. Санкт-Петербурга Н.Ю. Беловой за помощь в проведении исследования.

## ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы в равной степени подготавливали и обрабатывали материал к публикации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобошко М.Ю., Гарбарук Е.С., Жилинская Е.В., Салахбеков М.А. Центральные слуховые расстройства (обзор литературы). *Российская оториноларингология*. 2014. № 5. С. 87.
- Гайкова Ю.С., Ляксо Е.Е. Индивидуальный вклад характеристик материнской речи в речевое развитие ребенка первого года жизни. *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 3: Биология. 2011. № 3. С. 66–74.
- Гриненко С.В. Гендерная асимметрия в образовании. *Современные научные исследования и инновации*. 2014. № 12 (3). URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/12/41818>
- Еркудов В.О., Огородникова Е.А., Пуговкин А.П., Сергеев И.В., Сляпцова Т.Н., Кундрат Е.О., Лупанова П.А., Пахомова М.А., Денисенко М.Д., Балашов А.Л. Выделение голоса целевого диктора в условиях речевой конкуренции у школьников с различным психоэмоциональным статусом. *Педиатр*. 2019. Т. 10. № 4. С. 51–59. <https://doi.org/10.17816/PED10451>
- Королева И.В. *Основы аудиологии и слухопротезирования*. СПб: КАРО, 2022. 448 с.
- Королева И.В., Огородникова Е.А., Пак С.П., Левин С.В., Балякова А.А., Шапорова А.В. Методические подходы к оценке динамики развития процессов слухоречевого восприятия у детей с кохлеарными имплантами. *Российская оториноларингология*. 2013. № 3. С. 75–85.
- Королева И.В., Огородникова Е.А., Пак С.П., Левин С.В. Значение центральных механизмов слуха в восстановлении восприятия речи у глухих пациентов после кохлеарной имплантации. *Специальное образование*. 2017. № 3. С. 100.
- Огородникова Е.А., Балякова А.А., Жилинская Е.В., Охарева Н.Г., Пак С.П., Бобошко М.Ю. Слуховая тренировка как метод реабилитации пациентов с нарушениями слуха и речи. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017. Т. 23. № 1. С. 33.
- Огородникова Е.А., Лабутина О.В., Пак С.П. Имитация сложной акустической сцены при стимуляции через головные телефоны. *Вестник психофизиологии*. 2022. № 2. С. 140–146. <https://doi.org/10.34985/o0640-6924-4290-f>
- Огородникова Е.А., Стоярова Э.И., Балякова А.А. Особенности слухоречевой сегментации у детей школьного возраста с нормальным слухом и нарушениями слуха и речи. *Сенсорные системы*. 2012. Т. 26. № 1. С. 20–31.

- Andreeva I.G. Spatial selectivity of hearing in speech recognition in speech-shaped noise environment. *Hum Physiol.* 2018. V. 44 (2): 226–236. <https://doi.org/10.1134/S0362119718020020>
- Bregman A.S. *Auditory scene analysis: the perceptual organization of sound.* Cambridge: MIT Press. 1990.
- Bronkhorst A.W. The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception & Psychophysics.* 2015. V. 77 (5). P. 1465–1487. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Cherry E.C. Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *J. Acoust. Soc. Am.* 1953. V. 25. № 5. P. 975.
- Efendi D., Caswini N., Rustina Y., Iskandar A.D. Combination of mother therapeutic touch (MTT) and maternal voice stimulus (MVS) therapies stabilize sleep and physiological function in preterm infants receiving minor invasive procedures. *Journal of Neonatal Nursing.* 2018. № 6 (24). P. 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.jnn.2018.08.001>
- Fogerty D., Ahlstrom J.B., Bologna W.J., Dubno J.R. Sentence intelligibility during segmental interruption and masking by speech-modulated noise: Effects of age and hearing loss. *J Acoust Soc Am.* 2015. 137 (6): 3487–501. <https://doi.org/10.1121/1.4921603>
- Gutschalk A., Dykstra A.R. Functional imaging of auditory scene analysis. *Hear. Res.* 2014. V. 307. P. 98.
- Kalikow D.N., Stevens K.N., Elliott L.L. Development of a test of speech intelligibility in noise using sentence materials with controlled word predictability. *J Acoust Soc Am.* 1977. 61 (5): 1337–51. <https://doi.org/10.1121/1.381436> PMID: 881487
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing.* Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder.* San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.
- Popper A.N., Fay R.R. (Eds). *Perspectives on auditory research.* Springer handbook of auditory research. 2014. 680 p.
- Shamma S.A., Elhilali M., Micheyl C. Temporal coherence and attention in auditory scene analysis. *Trends Neurosci.* 2011. V. 34. P. 114.

## Features of speech signal recognition in conditions of vocal competition with normal hearing and with hearing or speech disorders

A. A. Balyakova<sup>a</sup>, O. V. Labutina<sup>a</sup>, I. S. Medvedev<sup>a</sup>, S. P. Pak<sup>a</sup>, and E. A. Ogorodnikova<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 199034 Makarov emb., 6, St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup> E-mail: ogorodnikovaea@infran.ru

We studied the features of speech signals perception in conditions of vocal competition based on gender (male/female voice) in subjects of different ages and status of auditory and speech functions. Psychophysical measurements were carried out while simulating a “speech cocktail” situation by simultaneously pronounced different words by a male and female. The average fundamental voice frequency for the male speaker was  $108 \pm 5.92$  Hz, for the female speaker –  $185 \pm 12.03$  Hz. Both speakers were standard native speakers of the Russian language. Digital recordings of speech signals were equalized in intensity and compounded so that the total test stimulus was a synchronized mixture of words spoken by a male (M) and female (F) voice. Test speech signals were presented through headphones or through a speaker located in front of the auditor at a distance of 50 cm. The indicators of reaction time and the number of correct recognitions of words of the target speaker (M or F) were compared in 4 groups of subjects of different ages and hearing or speech status: adult subjects with normal hearing and speech ( $n = 35$ ) and with hearing impaired ( $n = 26$ ); schoolchildren with normotypical development ( $n = 26$ ) and with speech disorders ( $n = 25$ ). The results indicated a falling in the ability to segregate target speech streams under conditions of vocal competition in the subjects with hearing and speech dysfunctions included in the comparative study. Differences in the perception of male and female voices in subjects with hearing loss and with speech problems were obtained. This result may have a biological and social basis. The data have practical significance for the development of a system of auditory and speech training and modern hearing aid technologies.

**Key words:** voice competition conditions, speech recognition, speech cocktail, gender differences of voice, hearing loss, speech disorders, auditory and speech training

## REFERENCES

- Boboshko M.J., Garbaruk E.S., Zhilinskaya E.V., Salakhbekov M.A. *Tsentrāl'nye slukhovyie rasstroistva (obzor literatury)* [Central auditory processing disorders (literature review)] *Russian otorhinolaryngology.* 2014. V. 5. P. 87 (in Russian).
- Gaykova Yu.S., Lyakso E.E. *Individual'nyy vklad kharakteristik materinskoj rechi v rechevoye razvitiye rebenka pervogo goda zhizni.* [Individual contribution of maternal speech characteristics to the speech development of a child in the first year of life] *Bulletin of St. Petersburg University. Series 3: Biology.* 2011. № 3. P. 66–74 (in Russian).

- Grinenko S.V. *Gendernaya assimetriya v obrazovanii*. [Gender asymmetry in education] Modern scientific research and innovation. 2014. № 12 (3). URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/12/41818> (in Russian).
- Yerkudov V.O., Ogorodnikova E.A., Pugovkin A.P., Sergeev I.V., Slyaptsova T.N., Kundrat Ye.O., Lupanova P.A., Pakhomova M.A., Denisenko M.D., Balashov A.L. *Vydeleniye golosa tselevogo diktora v usloviyakh rechevoy konkurentsii u shkol'nikov s razlichnym psikhoe-motsional'nym statusom*. [Selection of the target speaker's voice in conditions of speech competition among schoolchildren with different psycho-emotional status]. *Pediatrician*. 2019. V. 10. № 4. P. 51–59. <https://doi.org/10.17816/PED10451> (in Russian).
- Koroleva I.V. *Osnovy audiologii i slukhoprotezirovaniya*. [Fundamentals of audiology and hearing aid]. SPb.: KARO, 2022. 448 p. (in Russian).
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A., Pak S.P., Levin S.V., Baliakova A.A., Shaporova A.V. *Metodicheskiye podkhody k otsenke dinamiki razvitiya protsessov slukhorechevogo vospriyatiya u detey s kokhlearnymi implantami*. [Methodological approaches to assessing the dynamics of the development of hearing and speech perception processes in children with cochlear implants] *Russian Otorhinolaryngology*. 2013. № 3. P. 75–85. (in Russian).
- Koroleva I.V., Ogorodnikova E.A., Pak S.P., Levin S.V. *Znachenie tsentral'nykh mekhanizmov slukha v vosstanovlenii vospriyatiya rechi u glukhikh patsiyentov posle kokhlearnoy implantatsii*. [The importance of central hearing mechanisms in the restoration of speech perception in deaf patients after cochlear implantation] *Special education*. 2017. № 3. P. 100. (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Balyakova A.A., Zhilinskaya E.V., Okhareva N.G., Pak S.P., Boboshko M.Yu. *Slukhovaya trenirovka kak metod rehabilitatsii patsiyentov s narusheniyami slukha i rechi* [Auditory training as a method of rehabilitation of patients with hearing and speech impairments] *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017. V. 23. № 1. P. 33. (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Labutina O.V., Pak S.P. *Imitatsiya slozhnoy akusticheskoy stseny pri stimulyatsii cherez golovnyye telephony* [Simulation of a complex acoustic scene when stimulated through headphones]. *Bulletin of psychophysiology*. 2022. № 2. P. 140–146. <https://doi.org/10.34985/o0640-6924-4290-f> (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Stolyarova E.I., Balyakova A.A. *Osobennosti slukhorechevoy segmentatsii u detey shkol'nogo vozrasta s normal'nym slukhom i narusheniyami slukha i rechi* [Features of auditory-speech segmentation in school-age children with normal hearing and hearing and speech impairments] *Sensory systems*. 2012. V. 26. № 1. P. 20–31. (in Russian).
- Andreeva I.G. Spatial selectivity of hearing in speech recognition in speech-shaped noise environment. *Hum Physiol*. 2018. V. 44 (2). P. 226–236. <https://doi.org/10.1134/S0362119718020020>
- Bregman A.S. *Auditory scene analysis: the perceptual organization of sound*. Cambridge: MIT Press. 1990.
- Bronkhorst A.W. The cocktail-party problem revisited: Early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception & Psychophysics*. 2015. V. 77(5). P. 1465–1487. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Cherry E.C. Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *J. Acoust. Soc. Am*. 1953. V. 25. № 5. P. 975.
- Efendi D., Caswini N., Rustina Y., Iskandar A.D. Combination of mother therapeutic touch (MTT) and maternal voice stimulus (MVS) therapies stabilize sleep and physiological function in preterm infants receiving minor invasive procedures. *Journal of Neonatal Nursing*. 2018. № 6 (24). P. 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.jnn.2018.08.001>
- Fogerty D., Ahlstrom J.B., Bologna W.J., Dubno J.R. Sentence intelligibility during segmental interruption and masking by speech-modulated noise: Effects of age and hearing loss. *J Acoust Soc Am*. 2015. 137 (6): 3487–501. <https://doi.org/10.1121/1.4921603>
- Gutschalk A., Dykstra A.R. Functional imaging of auditory scene analysis. *Hear. Res*. 2014. V. 307. P. 98.
- Kalikow D.N., Stevens K.N., Elliott L.L. Development of a test of speech intelligibility in noise using sentence materials with controlled word predictability. *J Acoust Soc Am*. 1977. 61 (5): 1337–51. <https://doi.org/10.1121/1.381436>. PMID: 881487
- Moore B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Leiden. Brill. 2012. 442 p.
- Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego. Plural Publishing. 2014. V. 1. Auditory neuroscience and diagnosis. 768 p.
- Popper A.N., Fay R.R. (Eds). *Perspectives on auditory research*. Springer handbook of auditory research. 2014. 680 p.
- Shamma S.A., Elhilali M., Micheyl C. Temporal coherence and attention in auditory scene analysis. *Trends Neurosci*. 2011. V. 34. P. 114.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.858.72:616.28-072.7-053

ПСИХОАКУСТИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОЗРЕВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОТДЕЛОВ  
СЛУХОВОЙ СИСТЕМЫ

© 2023 г. И. В. Савенко<sup>1,\*</sup>, Е. С. Гарбарук<sup>1,2</sup>, М. Ю. Бобошко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО “Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова”  
Минздрава России

197022 Санкт-Петербург, ул. Л. Толстого, д. 6–8, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет”  
Минздрава России

194100 Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2, Россия

\*E-mail: irina@savenko.su

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 25.06.2023 г.

Принята к публикации 18.09.2023 г.

Адекватное возрасту морфофункциональное формирование центральных отделов слуховой системы определяет нормальную траекторию слухоречевого развития ребенка. Ее нарушение может приводить к возникновению центральных слуховых расстройств (ЦСР) и ассоциированных с ними проблем психоречевого и общего развития. Достаточно информативным и наиболее доступным диагностическим инструментом для выявления признаков ЦСР, в том числе в детской практике, может быть психоакустическое тестирование, выполнение которого возможно, начиная с возраста 4 лет, при наличии нормативных данных для различных возрастных групп. Цель исследования – аудиологическая оценка функционального состояния центральных отделов слуховой системы с использованием психоакустических методов у здоровых детей различного возраста. *Материалы и методы.* Обследованы 125 здоровых доношенных детей в возрасте от четырех до 17 лет с нормальной периферической слуховой функцией без слухоречевых, языковых, когнитивных и академических проблем. Дети были разделены на пять возрастных групп: 4–5 лет 11 мес; 6–7 лет 11 мес; 8–9 лет 11 мес; 10–11 лет 11 мес; 12 лет и старше. Наряду с традиционным аудиологическим обследованием всем детям проводили тесты по оценке функционального состояния центральных отделов слухового анализатора: исследование восприятия ритмических последовательностей стимулов; тест обнаружения паузы (Random Gap Detection Test, RGDT); моноауральное низко избыточное речевое тестирование в тишине и на фоне шумовой помехи; тест бинаурального взаимодействия в формате чередующейся бинаурально речи; дихотическое тестирование; тестирование с применением упрощенной версии русского матричного фразового теста в шуме (RUMatrix). *Результаты.* На основании сведений о чувствительности используемых тестов к функциональному состоянию различных структур центрального звена слуховой системы были продемонстрированы признаки их созревания в направлении “снизу-вверх” по мере взросления. Темп эволюционных процессов, который оценивался по результатам соответствующих тестов, зависел от возрастной группы испытуемых. Показано, что морфофункциональное развитие центрального отдела слуховой системы не завершается к подростковому возрасту. *Выводы.* Полученные результаты могут быть использованы для проведения дифференциальной диагностики между незрелостью центральной слуховой системы, ЦСР и слухоречевыми нарушениями иной природы у детей различных возрастных групп.

*Ключевые слова:* центральная слуховая обработка, дети, созревание слуховых центров, центральные слуховые расстройства, временной слуховой анализ, речевые тесты

DOI: 10.31857/S0235009223040078, EDN: JSLOKZ

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных условий формирования полноценной речи является нормальное функционирование центральных отделов слуховой системы, которое предполагает способность мозга к эффективной обработке акустической информа-

ции. Эта способность, которая анатомически и функционально тесно сопряжена с высшими корковыми функциями, обеспечивает возможность локализации и латерализации звуковых стимулов, дифференциации звуков, распознавания акустических сигналов, анализа временных

характеристик акустической информации, восприятия редуцированной звуковой информации, а также звуков в присутствии конкурирующего акустического стимула (Musiek, 2014).

Морфологически центральная слуховая система закладывается на 7–8-й неделе беременности, первые признаки ее функционирования отмечаются у плода с гестационным возрастом 33–35 нед, а завершает она свое морфофункциональное созревание в корковых слуховых центрах к раннему зрелому возрасту (Савенко, 2015; Moore, Linthicum, 2007; Graven, Browne, 2008; Lebel, Beaulieu, 2011; Eggermont, Moore, 2012; Ouyang et al., 2017; Lebel, Deoni, 2018). Своевременно не диагностированные центральные слуховые расстройства (ЦСР) могут иметь место в любом возрасте, в том числе при сохранном периферическом слухе, и приводить к слухоречевым, когнитивным, регуляторным, эмоциональным нарушениям в развитии ребенка. Вместе с тем ранние (ре)абилитационные мероприятия, основанные на концепции пластичности развивающегося мозга, позволят нивелировать или минимизировать обнаруженный дефицит. В то же время ЦСР важно дифференцировать с функциональной незрелостью центральных отделов слуховой системы (например, при недоношенности), а также с иной патологией, в рамках которой могут иметь место речевые проблемы. К последним можно отнести синдром гиперактивности и дефицита внимания, гетерогенную группу когнитивных и поведенческих расстройств у детей с трудностями в обучении (задержкой психического развития), специфические расстройства экспрессивной речи и другие (Чутко, Елецкая, 2019).

Дефицит центральной слуховой обработки может быть идентифицирован посредством объективных методов, включающих электрофизиологическое обследование и различные технологии нейровизуализации. Однако наиболее доступным и достаточно информативным диагностическим инструментом для выявления признаков ЦСР может быть психоакустическое тестирование, выполнение которого возможно у детей, начиная с возраста четырех лет (Sharma et al., 2009; Musiek, 2014; Rahimi et al., 2019; Bouyssi-Kobar et al., 2018; Snowling et al., 2018). Диагностический процесс потребует сопоставления результатов обследования детей различного возраста с нормативными данными тестирования, полученными для здоровых испытуемых соответствующих возрастных групп. “Золотым стандартом” такого обследования является батарея психоакустических тестов, адаптированная для детского возраста (Бобошко и др., 2010, 2021; Bellis, 2003; Musiek, Chermak, 2015), которая включает:

– тесты слуховой дифференциации (определение дифференциальных порогов по частоте, ин-

тенсивности, длительности сигналов, а также минимально отличных речевых стимулов);

– тесты, оценивающие временную обработку звуков – разрешающую способность слуховой системы и ее способность распознавать структуру временной последовательности акустических стимулов;

– дихотические тесты, которые оценивают способность слуховой системы выделять (бинауральное разделение) или интегрировать (бинауральная интеграция) различные акустические стимулы;

– моноуральные низкоизбыточные тесты, оценивающие способность слуховой системы распознавать редуцированные речевые сигналы или речь, предъявляемую на фоне конкурирующего акустического стимула;

– тесты бинаурального взаимодействия, оценивающие эффективность объединения акустической информации, поступающей от обеих ушей (различающейся по времени, интенсивности или частоте), и характеризующие способность слуховой системы к локализации, латерализации, определению различий при маскировке.

Цель настоящего исследования – аудиологическая оценка функционального состояния центральных отделов слуховой системы с использованием психоакустических методов у здоровых детей различного возраста.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В исследование были включены 125 здоровых доношенных детей в возрасте от 4 до 17 лет с нормальной периферической слуховой функцией (пороги слуха не превышали 15 дБ над нормальным порогом слышимости во всем стандартном диапазоне частот), без факторов риска по тугоухости в анамнезе, с нормальными показателями развития слухоречевых, коммуникативных, когнитивных навыков и академической успешности. Дети были разделены на пять возрастных групп испытуемых: первую группу составили 10 детей в возрасте от 4 до 5 лет 11 мес (медиана 5 лет); вторую – 50 детей от 6 до 7 лет 11 мес (медиана 6.5); третью – 29 детей от 8 до 9 лет 11 мес (медиана 8.5); четвертую – 26 подростков от 10 до 11 лет 11 мес (медиана 10.5); пятую – 10 подростков 12 лет и старше (медиана 13.5 лет). Всем испытуемым проводили стандартный оториноларингологический осмотр с использованием отомикроскопии, а также традиционное аудиологическое обследование, включавшее пороговую аудиометрию, акустическую импедансометрию, регистрацию вызванной отоакустической эмиссии. Оценку функционального состояния центральных отделов слуховой системы осуществляли на основании поведенческой реакции ребенка при выпол-

нении неречевых и речевых тестов с обязательным их сочетанием. Такой формат исследования позволяет избежать влияния на результат тестирования когнитивных процессов и дифференцировать центральную слуховую дисфункцию с нарушениями обработки лингвистической информации (Musiek, 2014; Sharma et al., 2019).

*Неречевые методы.* Неречевые методы включали:

– тест по оценке восприятия ритмических последовательностей стимулов, при котором детям бинаурально предъявляли последовательности из трех звуковых элементов различной длительности: “короткого” (К) – 300 мс и “длинного” (Д) – 600 мс, с паузой между ними в 300 мс; спектральные характеристики стимулов соответствовали звучанию трех музыкальных инструментов – гобоя, скрипки, пианино; сочетания К- и Д-элементов могли образовывать пять вариантов ритмического рисунка – ДКД, ДДК, ККД, КДК, КДД, при тестировании оценивался показатель правильных опознаваний ритма (в %) (Огородникова и др., 2012);

– тест обнаружения паузы в модификации (Random Gap Detection Test, RGDT) (Keith, 2002).

*Речевая разборчивость.* Для оценки речевой разборчивости выполняли четыре теста.

– Монауральное низко избыточное речевое тестирование, в том числе на фоне контра- и ипсилатерально предъявляемого белого шума различной интенсивности (оценивали разборчивость односложных слов в тишине и на фоне помехи с использованием девяти таблиц односложных слов, по десять слов в каждой, которые были сформированы на основании фонетически сбалансированных таблиц речевого теста, разработанного в лаборатории слуха и речи СПбГМУ (Кукс и др., 1988; Лопотко, 1999). Отобранный фонетический материал был представлен знакомыми для детей исследуемого возраста словами, начитанными одним диктором мужчиной (Бобошко и др., 2010; Бобошко, 2012).

– Тест бинаурального взаимодействия в формате чередующейся бинаурально речи (ЧБР), посредством которого вычислялся процент разборчивости при бинауральном предъявлении сигнала; каждое слово теста было разделено пополам: последовательно первая часть предъявлялась в одно, а затем вторая часть – в другое ухо (Бобошко и др., 2010; Бобошко, 2012; Бобошко, Риехайнен, 2019).

– Дихотическое тестирование, которое включало предъявление: пар двузначных числительных (стандартный тест), при этом ответ считался правильным, если оба числа из пары были названы верно (Бобошко и др., 2021; Musiek, Chermak, 2014); пар однозначных числительных, что представляло собой адаптированную детскую версию

(“цифра-цифра”) стандартного теста; однозначных числительных и односложных слов, что было адаптированной детской версией теста в формате “цифра-слово”, при которой испытуемый должен был повторить оба слова (Бобошко и др., 2010; Бобошко, 2012).

– Русский матриксный фразовый тест (RUMatrix) с использованием упрощенной версии с определением соотношения сигнал/шум (SNR) в дБ УЗД, при котором достигался 50%-ный порог разборчивости речи, обозначаемый как  $SRT_{50}$  (*Speech Reception Threshold*) (Гарбарук и др., 2020).

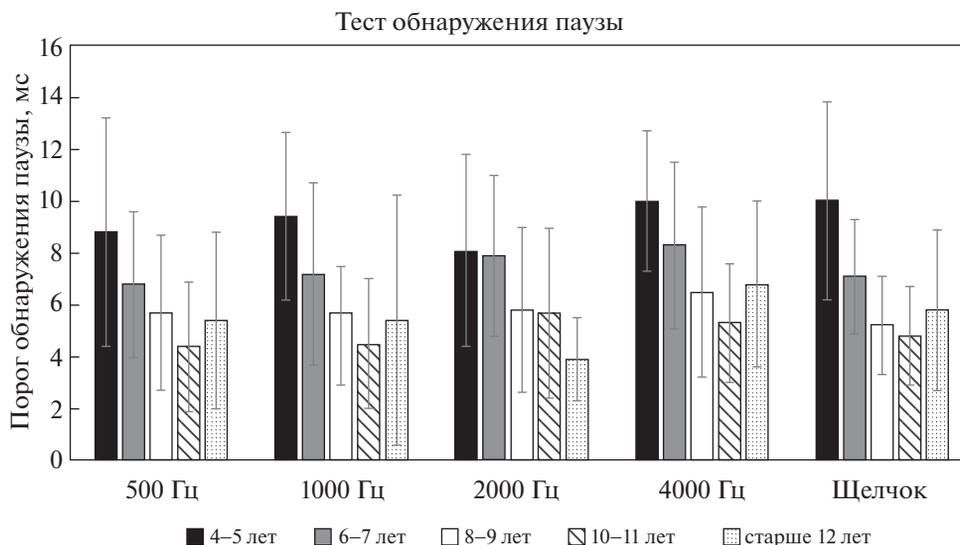
Прослушивание в процессе исследования осуществлялось через наушники TDH39 с использованием клинического аудиометра AC40 (Interacoustics, Дания), аудиоплеера и дисков с записями теста обнаружения паузы, а также артикуляционных таблиц односложных слов и одно- и двузначных числительных. Для оценки восприятия последовательностей стимулов применялась компьютерная программа с записью коротких последовательностей тональных сигналов. Тест RUMatrix проводили с использованием ноутбука, программного обеспечения Oldenburg Measurement Application (HörTech GmbH, Oldenburg), звуковой карты EarBox (Auritec, Hamburg, Germany) и головных телефонов Sennheiser HDA200.

Все исследования были выполнены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях и одобрены локальным биоэтическим комитетом ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет” (Положение о локальном этическом комитете при ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет” МЗ РФ от 24.10.2022) и ФГБОУ ВО “Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова” (Положение о локальном этическом комитете при ФГБОУ ВО “Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова” МЗ РФ, приказ № 177 от 24.10.2022).

Анализ полученных результатов проводили посредством стандартных средств статистической обработки данных. Достоверность различий оценивалась при помощи t-критерия Стьюдента.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

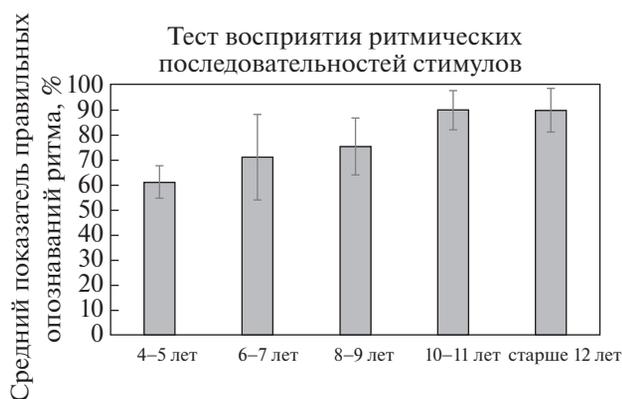
Пороги обнаружения паузы у детей всех возрастных групп соответствовали нормативным данным для взрослых ( $\leq 20$  мс) (Keith, 2002). Средние показатели RGDT уменьшались с возрастом: они достоверно ( $p < 0.01$ ) различались при частоте предъявляемого тона 500 Гц у испытуемых пер-



**Рис. 1.** Результаты оценки временной разрешающей способности посредством теста обнаружения паузы для разных возрастных групп детей. По оси ординат – порог обнаружения паузы в мс, по оси абсцисс – возрастные группы.

вой и четвертой групп; при частоте 1000 Гц – у детей первой и третьей, а также второй и четвертой групп; при частоте 2000 Гц – у испытуемых первой и четвертой групп; при частоте 4000 Гц – у детей первой и третьей, а также второй и четвертой групп. При стимуляции широкополосным щелчком достоверная разница ( $p < 0.01$ ) была обнаружена у детей первой и третьей, а также второй и четвертой групп (рис. 1).

Средний показатель правильных опознаний ритма возрастал с увеличением возраста. Его значения достоверно различались ( $p < 0.01$ ) между



**Рис. 2.** Результаты оценки эффективности обработки временной последовательности посредством теста восприятия ритмических последовательностей стимулов. По оси ординат – средний показатель правильных опознаний ритма в %, по оси абсцисс – возрастные группы.

группами испытуемых: первой и третьей – 61.3 и 75.5%; второй и четвертой – 71.3 и 90.1%; третьей и четвертой – 75.5 и 90.1%. У детей старшей группы этот показатель не изменялся, оставаясь стабильным (рис. 2).

Результаты речевого тестирования детей представлены в табл. 1, из которой следует, что монологическая разборчивость односложных слов в тишине была одинаково высокой и соответствовала нормальным значениям для взрослых испытуемых (Бобошко и др., 2016) у детей всех групп, варьируя в пределах 88.3–98.8%.

На фоне ипсилатерально предъявляемого шума при соотношении сигнал/шум, равном +6 дБ, достоверное улучшение ( $p < 0.01$ ) показателей тестирования было выявлено для правого уха между детьми первой и второй группы (68.3 и 83.3%), для левого уха между испытуемыми первой и третьей группы (70 и 85%). Обращает на себя внимание широкий разброс индивидуальных значений, который уменьшался по мере взросления, а также то, что, начиная с 6–7-летнего возраста разборчивость речи при этом формате тестирования соответствовала норме для взрослых зрелого возраста (Бобошко и др., 2021). Самая низкая разборчивость речи была получена у детей младшей возрастной группы при ипсилатеральном использовании шумовой помехи и величине SNR, равной 0 дБ, для правого уха ( $p < 0.01$ ) – при сравнении с детьми 6–7 лет (54.2 и 76.9%) и для левого уха ( $p < 0.05$ ) – при сравнении с детьми четвертой группы. Все дети третьей, четвертой и пятой групп демонстрировали высокие результаты ( $\geq 70\%$ ). Отмечена тенденция (без достоверной разницы) к лучшим показателям разборчивости для правого

**Таблица 1.** Результаты речевых тестов ( $M \pm m$ ) \* у детей разных возрастных групп

Название теста		Разборчивость, в %				
		4–5 лет ( $n = 10$ ) **	6–7 лет ( $n = 50$ )	8–9 лет ( $n = 29$ )	10–11 лет ( $n = 26$ )	Старше 12 лет ( $n = 10$ )
Монауральная разборчивость односложных слов в тишине	Правое ухо	93.3 ± 8.2	97.7 ± 3.2	96.6 ± 4.8	98.1 ± 3.2	98.1 ± 3.7
	Левое ухо	88.3 ± 6.8	97.7 ± 4.2***	97.8 ± 4.7	98.4 ± 3.5	98.8 ± 3.5
Монауральная разборчивость на фоне ипсилатеральной помехи (SNR = 0 дБ)	Правое ухо	54.2 ± 4.9	76.9 ± 17***	81.7 ± 7.9	72.7 ± 10.9	86.3 ± 9.2
	Левое ухо	60 ± 16	66.3 ± 15.9	73.9 ± 9.8	70 ± 10.1	78.8 ± 9.9
Монауральная разборчивость на фоне ипсилатеральной помехи (SNR = 6 дБ)	Правое ухо	68.3 ± 16.0	83.3 ± 15.4***	85.8 ± 9.7	90 ± 7.6	95.6 ± 5
	Левое ухо	70 ± 18.9	81.9 ± 10.5	85 ± 12***	82.7 ± 9.6	93.1 ± 8
Монауральная разборчивость на фоне контралатеральной помехи (SNR = 0 дБ)	Правое ухо	70 ± 15.1	82.2 ± 11.5	84.1 ± 14	79.6 ± 12.8	82.5 ± 10.4
	Левое ухо	81.7 ± 14.7****	92.4 ± 10.2****	93.4 ± 8.1****	92 ± 9.4****	91.3 ± 13.6
Тест чередующейся бинаурально речью		83.1 ± 10.7	92.6 ± 6.2***	94.7 ± 5.9	98.5 ± 2.7	98.8 ± 2.3
Дихотический тест бинауральной интеграции в формате “цифра-слово”		68.3 ± 20.4	86.2 ± 11.1***	91.4 ± 8.2	95.2 ± 6.2***	93.8 ± 7.4
Дихотический тест бинауральной интеграции в формате “цифра-цифра”		65.8 ± 16.9	89.9 ± 11.5***	98.1 ± 3.9***	98.8 ± 2.5	100

Примечание: \*M – среднее арифметическое;  $m$  – стандартное отклонение; \*\* $n$  – число испытуемых; \*\*\* –  $p < 0.01$  между группами; \*\*\*\* –  $p < 0.01$  между ушами внутри групп.

уха, по сравнению с левым. Обращают на себя внимание достоверно лучшие ( $p < 0.01$ ) показатели разборчивости на фоне контралатерального шума равной интенсивности для левого уха по сравнению с правым у детей всех групп за исключением испытуемых старшей возрастной группы, для которой отмеченная разница была незначимой.

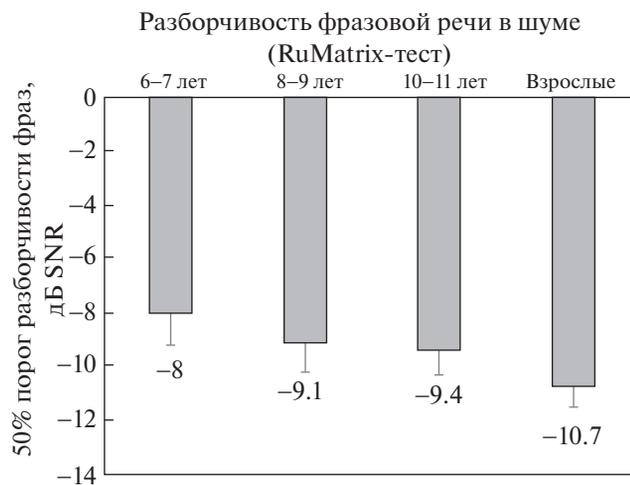
Тестирование в формате упрощенной версии RUMatrix продемонстрировало повышение помехоустойчивости речевого слуха по мере взросления (рис. 3).

Однако несмотря на прогресс, даже при достижении детьми возраста 10–11 лет, что согласно периодизации ВОЗ соответствует раннему подростковому возрасту, результаты теста не достигали показателя взрослых, равных  $-10.7 \pm 0.8$  дБ SNR (Гарбарук и др., 2020).

Тест бинаурального взаимодействия ЧБР успешно выполняли дети всех групп: норматив-

ные данные для этого теста в группе взрослых составляют  $\geq 80\%$  разборчивости (Кукс и др., 1988). В то же время результаты тестирования во второй группе (92.6%) были достоверно лучше ( $p < 0.01$ ), чем в группе детей младшего возраста (83.1%), а также двукратно уменьшался разброс индивидуальных значений по мере взросления в возрастных промежутках 4–6 и 8–10 лет.

С дихотическими тестами бинауральной интеграции в формате “цифра-слово” достоверно лучше ( $p < 0.01$ ) справлялись дети второй по сравнению с детьми первой группы (86.2 и 68.3% соответственно), а также испытуемые четвертой по сравнению с испытуемыми второй группы (95.2 и 86.2%). При тестировании с использованием односторонних числительных достоверное ( $p < 0.01$ ) улучшение результатов было отмечено только для детей второй по сравнению с детьми первой группы (89.9 и 65.8% соответственно). Однако наиболее значимые и репрезентативные различия



**Рис. 3.** Результаты разборчивости фразовой речи на фоне шумовой помехи для разных возрастных групп детей (данные по взрослым испытуемым (Гарбарук и др., 2020)).

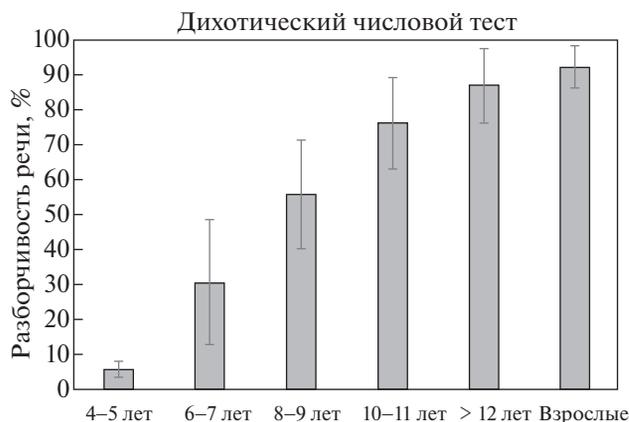
По оси ординат – 50% порог разборчивости фраз в дБ SNR (соотношения сигнал/шум), по оси абсцисс – возрастные группы.

между разными возрастными группами были обнаружены при дихотическом предъявлении двузначных числительных (рис. 4).

При этом пятеро детей первой группы и 29 второй группы не справились с тестом, но в дальнейшем показатели тестирования достоверно ( $p < 0.01$ ) улучшались по мере взросления в каждой группе при сравнении попарно, приближаясь у детей, достигших 12 лет, к показателю, характерному для взрослых, равному  $92.3 \pm 6.0\%$  (Бобошко и др., 2016).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность процессов временной обработки акустической информации слуховой системой зависит от состояния временной разрешающей способности и способности к анализу временных последовательностей звуковых стимулов. Временная разрешающая способность в нашем исследовании оценивалась посредством теста обнаружения паузы, результаты которого у детей всех возрастных групп были в пределах нормальных значений для взрослых зрелого возраста, равных  $\leq 20$  мс (Keith, 2002). Тем не менее порог обнаружения паузы достоверно уменьшался по средним данным при предъявлении всего спектра частот вплоть до достижения детьми возраста 11 лет, свидетельствуя о зависимости механизма разрешающей способности слуховой системы от возраста обследованных детей. При этом наиболее значимо пороги обнаружения паузы уменьшались при стимуляции высокочастотными то-



**Рис. 4.** Результаты дихотического числового теста для разных возрастных групп детей (данные по взрослым испытуемым (Бобошко и др., 2016)).

По оси ординат – разборчивость речи в %, по оси абсцисс – возрастные группы.

нами. Это, вероятно, обусловлено дискретностью созревания этой функции – восприятие паузы в области высоких частот формировалось быстрее по сравнению с низкими, по всей видимости, в связи с тем, что различие высокочастотных тонов в онтогенезе формируется уже в первом полугодии жизни, а низкочастотных – продолжается вплоть до достижения ребенком возраста 11 лет (Litovsky, 2015). Результаты электрофизиологических исследований (регистрации слуховых вызванных потенциалов) также свидетельствуют о более быстром “созревании” обработки высокочастотных тонов как на стволовом, так и на корковом уровне (Cone, Whitaker, 2013). Полученные нами данные расходятся с результатами других исследователей, представленными в литературе, несмотря на их разнородность. В большинстве работ, в которых оценка временной разрешающей способности слуховой системы в контексте онтогенеза осуществлялась посредством RGDТ, а также теста порога обнаружения паузы в шуме, достоверного влияния возраста на результаты тестирования отмечено не было – показатели были стабильными, начиная с возраста 7 лет (Keith, 2002; Kelly, 2007; McDermott et al., 2016; Mattsson et al., 2018; Lewandowska et al., 2023). В связи с этим считается, что эта функция “созревает” уже к раннему школьному возрасту, поскольку зависит главным образом от функционального состояния ствола мозга, структуры которого участвуют в осуществлении первичного анализа и эффективного проведения звуковой информации в присутствии сложных перекрестных связей (Бобошко и др., 2021; Musiek, 2014). Действительно, классически амплитудные и временные характеристики коротколатентных слуховых вызванных потенциалов, которые отражают функциональ-

ное состояние стволовых (сублемнисковых) структур слухового проводящего пути, в целом сравниваются с показателями взрослых к 4–5 годам жизни (Inagaki et al., 1987; Scaiola et al., 2009; Kaga, 2022), свидетельствуя об их функциональной зрелости. Однако, во-первых, электрофизиологические исследования последнего времени свидетельствуют о том, что созревание стволовых структур продолжается в подростковом и вплоть до раннего взрослого возраста (Krizman et al., 2015; Skoe et al., 2015). Во-вторых, временная разрешающая способность слуховой системы также обеспечивается функционированием обоих полушарий головного мозга и слуховой коры (Бобошко и др., 2021; Musiek, 2014), а центральная нервная система, в том числе ее слуховое представительство, продолжает развитие в течение второго и обнаруживает свою окончательную зрелость к концу третьего десятилетия жизни (Lebel, Beaullieu, 2011; Cone, Whitaker, 2013; Lebel, Deoni, 2018). В связи с этим вопрос о влиянии возраста на формирование механизма временной разрешающей способности остается до конца не решенным (Dias et al., 2012; Buss et al., 2017; Mattsson et al., 2018), и вероятной причиной уменьшения порогов обнаружения паузы по мере взросления детей в нашем исследовании могло быть дальнейшее морфофункциональное развитие центральных отделов слуховой системы, главным образом слуховой коры.

Показатели теста бинаурального восприятия ритмических последовательностей стимулов прогрессивно улучшались от 61.3% у испытуемых первой группы до 90.1% у детей четвертой группы с достоверной разницей при попарном сравнении результатов, полученных для – первой и третьей, второй и четвертой, третьей и четвертой групп, достигая максимального значения к возрасту 10–11 лет и не изменяясь у детей старшей группы. Улучшение показателей этого теста, вероятно, было свидетельством более активного созревания механизмов, обеспечивающих определение временной последовательности у детей в конце первого – начале второго десятилетия жизни. Полученные нами данные в целом сопоставимы по величине в соответствующих возрастных группах при сравнении их с результатами других авторов при оценке этой функции, несмотря на несколько отличающиеся параметры тестирования (Neijenhuis et al., 2002; Schochat, Musiek, 2006; Kelly, 2007; McDermott et al., 2016; Mattsson et al., 2018; Włodarczyk et al., 2019; Lewandowska et al., 2023). Так, М. Левандовска с соавторами отмечают, что показатели тестирования детей 9 лет ( $73.8 \pm 18.1\%$ ) были достоверно лучше, чем у детей 7 лет ( $65.5 \pm 16\%$ ), а результаты тестирования детей 10 лет ( $81.5 \pm 11.7\%$ ) были значительно лучше, по сравнению с детьми 8 лет ( $67.7 \pm 21.6\%$ ). В дальнейшем авторы не обнаружили существен-

ного прироста среднего показателя правильных опознаваний ритма, который составил у детей 14 лет  $83.9 \pm 17\%$  (Lewandowska et al., 2023). Обнаруженная зависимость результатов тестирования от возраста, продолжающаяся по меньшей мере до достижения детьми 12 лет, свидетельствует о том, что процесс обработки временной последовательности звуковой информации является функцией более высокого порядка, требующей зрелости не только структур ствола мозга, но обоих полушарий головного мозга и слуховой коры, особенно левого полушария (у правой), а также мозолистого тела, обеспечивающего межполушарное взаимодействие (Бобошко и др., 2021; Neijenhuis et al., 2002; Schochat, Musiek, 2006; Musiek, 2014; Mattsson et al., 2018). С этой точки зрения представляет интерес работа, в которой проведен сравнительный анализ результатов психоакустического тестирования и регистрации средневольтных слуховых вызванных потенциалов (ССВП) при обследовании детей в возрастном диапазоне от 7 до 16 лет (Schochat, Musiek, 2006). Авторами было показано, что при существенном улучшении среднего показателя правильных опознаваний ритма вплоть до 12 лет, параметры ССВП, предположительным генератором которых является таламическая область, практически не меняются, что свидетельствует об участии в процессах временной обработки вышележащих отделов центральной слуховой системы. Известно, что формирование внутримушарных, а также транскаллозальных межполушарных связей в норме активно протекает между 6 и 12 годами жизни, окончательно не завершаясь к концу второго десятилетия жизни (Ковязина, 2016; Yamazaki et al., 2018). Следовательно, улучшение показателей обработки последовательностей акустических стимулов во времени, полученное в нашем исследовании, свидетельствовало главным образом о продолжающихся процессах миелинизации, в том числе формирования мозолистого тела, а также развитии слуховых областей коры головного мозга.

Монауральные низкоизбыточные речевые тесты интегративно отражают функциональное состояние центральных отделов слуховой системы, главным образом слуховой коры (Бобошко и др., 2021; Musiek, 2014). Улучшение результатов речевого тестирования по мере взросления, которое в большей степени было выражено при равной интенсивности полезного сигнала и помехи, свидетельствовало о продолжающихся процессах созревания в корковом конце анализатора, с чем также было связано улучшение разборчивости речи по мере взросления, оцениваемое в формате фразового теста RUMatrix, в том числе при сравнении с показателями взрослых. Несмотря на то что используемые нами параметры монаурального низкоизбыточного речевого тестирования от-

личались от представленных в других работах, похожие результаты оценки этой функции, которая улучшалась с возрастом, приводят большинство авторов. В своих исследованиях они использовали различные комбинации SNR в процессе монаурального предъявления односложных слов, а также речевой материал, подвергшийся искажению посредством компрессии, реверберации или фильтрации (Neijenhuis et al., 2002; Kelly, 2007; McDermott et al., 2016; Mattsson et al., 2018; Włodarczyk et al., 2019; Lewandowska et al., 2023). Однако, как правило, нижняя граница возрастного диапазона испытуемых в этих работах ограничивалась семью годами жизни, что не позволяло судить о состоянии и динамике процессов, обеспечивающих помехоустойчивость речевого слуха, у детей в возрастном промежутке 4–5 лет, который предшествует третьему, очень важному критическому периоду в слухоречевом развитии ребенка — формированию письменной речи (Чутко, Елецкая, 2019).

Общепринятым стандартом при выполнении монаурального речевого тестирования для оценки функционального состояния центральных отделов слуховой системы является использование ипсилатеральной помехи. Тем не менее располагая полученными данными применения в качестве конкурирующего стимула контралатерального белого шума, мы попытались эти результаты интерпретировать. На первый взгляд, лучшие показатели разборчивости для левого уха, по сравнению с правым, у детей всех возрастных групп помимо старшей, не соответствуют данным об “эффекте правого уха”, полученным многими авторами у детей в процессе дихотического тестирования (Neijenhuis et al., 2002; Schochat, Musiek, 2006; Kelly, 2007; McDermott et al., 2016; Mattsson et al., 2018; Włodarczyk et al., 2019; Lewandowska et al., 2023). Этими же исследователями отмечается, что преобладание правого уха, максимально выраженное в детском, практически полностью нивелируется к подростковому возрасту (McDermott et al., 2016; Mattsson et al., 2018; Włodarczyk et al., 2019; Lewandowska et al., 2023). Межполушарная асимметрия (латерализация, специализация) закладывается уже *in utero*, что фиксируется данными функциональной магнитно-резонансной томографии покоя (Thomason et al., 2014) и определяется комплексом генетических факторов (Güntürkün et al., 2020). У взрослых в связи с перекрестом слуховых путей преобладающим, более сильным и ранним ответом характеризуется слуховая кора, контралатеральная стимулируемому уху, при этом левая височная доля (главным образом у правшей) специализируется в обработке речевой информации. В то же время тональные стимулы (в основном их частотные характеристики) преимущественно обрабатываются корой правого полушария. Этому способствует адекват-

ное функционирование как ипси- и контралатеральных путей, так и межполушарных связей (Вайтулевич и др., 2019; Firszt et al., 2006; Hugdahl et al., 2008; Yamazaki et al., 2018; Güntürkün et al., 2020). В то же время правополушарная специализация, в частности, при обработке тональных посылок при их монауральном предъявлении, начинает формироваться только с пятилетнего возраста и достигает своего максимума к возрасту 15 лет, а корковый ответ на монаурально предъявляемые неречевые стимулы (широкополосные щелчки) регистрируется у детей в контралатеральных полушариях, меняя межполушарное доминирование у подростков, что свидетельствует о продолжающихся процессах латерализации (Yamazaki et al., 2018). У взрослых при стимуляции шумом главным образом активируется контралатеральная слуховая кора (Gutschalk, Steinmann, 2015). Однако подавление коркового ответа при контралатеральной маскировке белым шумом в большей степени выражено в правой гемисфере, по сравнению с левой, и при стимуляции правого уха, по сравнению с левым (Kawase et al., 2012). Это может отражать доминирование левого полушария в процессах центральной слуховой обработки в условиях маскировки. Вместе с тем нейрофизиологическими исследованиями (с использованием магнитоэнцефалографии) установлено, что у детей 7–8 лет, в отличие от взрослых, слуховая кора правой гемисферы демонстрирует большую зрелость паттерна активации коркового ответа, по сравнению с левой (Parviainen et al., 2019). В рамках общей закономерности правое полушарие обнаруживает свою морфофункциональную сформированность уже к пяти годам, тогда как левое и, в частности, его речевые зоны, — только к 8–12 (Семенович, 2017). Возможно, этой “возрастной” асимметрией, которая затем нивелируется, обусловлены лучшие показатели тестирования при контралатеральном предъявлении помехи (белого шума равной интенсивности) у испытуемых всех групп, за исключением старшей, включающей детей подросткового возраста. Следует также отметить, что “дихотический формат” предъявления полезного сигнала и широкополосного шума не является аналогом классического дихотического тестирования. Широкополосный шум в нашем исследовании можно рассматривать, как вариант “стационарного энергетического маскера”, который используется в условиях контралатеральной маскировки. Последняя, по определению Й.Дж. Цвислоцки, чаще носит характер центральной, в отличие от ипсилатеральной, имеющей место на уровне улитки и слухового нерва, поскольку в процесс вовлекается головной мозг (Zwislocki, 1972; Dole et al., 2009; Wightman et al., 2010; Kawase et al., 2012). В то время как взрослые при использовании широкополосного шума в качестве контралатерального маскера де-

монстрируют полное освобождение от маскировки (Dole et al., 2009), дети более подвержены влиянию этого вида маскировки, но оно сохраняется лишь до раннего подросткового возраста (Wightman et al., 2010; Litovsky, 2015) на фоне, как упоминалось выше, большей зрелости правой слуховой коры. Помимо этого, для преобладания правого, доминантного для обработки речи, полушария необходимо подавление гомологичной области недоминантного левого полушария. Это подавление обеспечивается функционированием межполушарных связей главным образом мозолистого тела, которое сохраняет свою морфофункциональную незрелость до 12-летнего возраста (Yamazaki et al., 2018; Güntürkün et al., 2020). Таким образом, полученные нами лучшие показатели разборчивости для левого уха, по сравнению с правым, в условиях контралатеральной маскировки, которые сохранялись у детей до достижения подросткового возраста, могут быть отражением онтогенеза центральной слуховой обработки. Он обусловлен продолжающимися процессами миелинизации и формирования межполушарных связей, увеличением плотности упаковки нервных трактов, усилением синаптических контактов, которые не завершаются к подростковому возрасту (Yamazaki et al., 2018). Тем не менее нельзя исключать влияния условий тестирования на полученные результаты, в связи с чем данный вопрос требует дополнительного рассмотрения.

Эффективность бинаурального взаимодействия зависит прежде всего от морфофункциональной зрелости ствола мозга, а также высших корковых слуховых центров (Bellis, 2003; Musiek, 2014). Поскольку, как уже отмечалось выше, ствольные структуры достигают своей зрелости по меньшей мере к 4–5-летнему возрасту, улучшение показателей в тесте ЧБР к возрасту 6–7 лет может быть отнесено на счет продолжающихся процессов созревания высших корковых центров слухового анализатора. В дальнейшем способность к объединению акустической информации, полученной от обеих ушей, в нашем исследовании оставалась стабильно высокой и соответствовала показателям взрослых (Бобошко и др., 2021). Аналогичные данные при оценке механизма бинаурального взаимодействия посредством теста определения различий в уровне бинауральной маскировки были получены Т.С. Маттссон с соавторами, однако в других исследованиях признаки совершенствования процесса бинаурального взаимодействия (использовался тест бинаурального слияния двух слогов) отмечались вплоть до подросткового возраста (Neijenhuis et al., 2002; Mattsson et al., 2018).

С дихотическими тестами бинауральной интеграции, зависимиыми от состояния ствола мозга, зрелости слуховой коры, а также полноценности

межполушарного взаимодействия (которое главным образом определяется морфофункциональной зрелостью мозолистого тела), хуже всех справлялись дети младшей возрастной группы. Результаты тестирования улучшались по мере взросления, и это было наиболее демонстративным при использовании двузначных числительных. Поскольку, как уже упоминалось выше, ствольные структуры практически полностью сформированы к окончанию дошкольного возраста, совершенствование способности к дихотическому слушанию свидетельствовало о продолжающемся развитии слуховой коры и мозолистого тела. Активное формирование этой самой крупной мозговой комиссуры характерно для детского и подросткового возраста, с чем связано улучшение результатов дихотического тестирования. Несмотря на отличный от используемого нами формат, сходные данные, которые фиксировали улучшение показателей теста с возрастом, были получены многими авторами, изучающими функциональное состояние центральной слуховой системы в онтогенезе (Neijenhuis et al., 2002; Kelly, 2007; McDermott et al., 2016; Mattsson et al., 2018; Włodarczyk et al., 2019; Lewandowska et al., 2023), однако, по некоторым сведениям, процессы, обеспечивающие дихотическое слушание, прогрессируют вплоть до взрослого возраста (Neijenhuis et al., 2002). Причиной этому могут быть продолжающиеся процессы миелинизации, которые динамично протекают, по одним сведениям, до окончания второго десятилетия жизни, а по другим – вплоть до ранней зрелости (Ковязина, 2016; Lebel, Beaulieu, 2011; Lebel, Deoni, 2018; Quinones et al., 2022; Isiklar et al., 2023).

Резюмируя изложенное, следует отметить, что нами впервые в отечественной литературе представлены результаты психоакустического тестирования русскоязычных детей широкого возрастного диапазона, которое позволило оценить функциональное состояние центральной слуховой системы в возрастном аспекте. С этой целью использовалось сочетание невербальных и вербальных методов, последние предполагали использование фонетически сбалансированных таблиц русского языка, адаптированных для детского возраста. Полученные данные позволяют не только судить о функциональном созревании различных отделов центральной слуховой системы у детей, начиная с четырехлетнего возраста, но и проводить дифференциальный диагноз в процессе верификации речевых расстройств различного происхождения. В целом результаты исследования согласуются с данными, опубликованными в зарубежной литературе, однако по ряду тестов отмечены некоторые отличия. Это касается в первую очередь теста обнаружения паузы (RGDT), оценивающего временную разрешающую способность слуховой системы. Если зару-

бежные авторы полагают, что эта функция уже к семилетнему возрасту достигает максимальных показателей и в дальнейшем остается стабильной, то результаты нашей работы свидетельствуют о продолжающихся процессах ее “созревания” до возраста 11 лет. Это может быть обусловлено дальнейшим морфофункциональным совершенствованием как стволовых структур, так и вышних отделов центральной слуховой системы, главным образом слуховой коры. Из факторов, влияющих на некоторую ограниченность полученных результатов, следует упомянуть относительную малочисленность младшей и старшей возрастных групп испытуемых, а также использование устаревшего речевого материала, который в настоящее время заменен новыми тестовыми таблицами односложных, двусложных и разносложных слов для тестирования детей различного возраста (Бобошко, Риехакайнен, 2019; Бобошко и др., 2021). Результаты работы с применением нового речевого материала будут представлены в следующих публикациях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты указывают на зависимость эффективности центральной слуховой обработки от возраста. Об этом свидетельствует улучшение результатов психоакустического тестирования по мере взросления, что обусловлено непрерывно протекающими процессами функционального созревания центральных отделов слуховой системы в направлении “снизу-вверх” (Выготский, 1999), часть из которых не завершается к подростковому возрасту. Похожие сведения были продемонстрированы и другими авторами, изучающими онтогенетические аспекты развития слуховой системы. Полученные в настоящем исследовании данные могут быть использованы для проведения дифференциальной диагностики между незрелостью центральной слуховой системы, центральными слуховыми расстройствами и слухоречевыми нарушениями иной природы у детей различных возрастных групп.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами государственного бюджета по Госзаданию на 2021–2023 гг. (№ г.р. 1022040800865-4).

## УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку финальной версии статьи перед публикацией.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобошко М.Ю., Калмыкова И.В., Гарбарук Е.С., Кибалова Ю.С., Савенко И.В. Современные аспекты детской речевой аудиометрии. *Сенсорные системы*. 2010. Т. 24 (4). С. 305–313.
- Бобошко М.Ю. *Речевая аудиометрия*. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГМУ, 2012. 64 с.
- Бобошко М.Ю., Салахбеков М.А., Жилинская Е.В., Мальцева Н.В., Савенко И.В., Тоголян Н.А. Аудиологическая оценка состояния центральных отделов слуховой системы при рассеянном склерозе. *Folia Otorhinolaryngol. et Pathologiae Respiratoriae*. 2016. V. 22 (4). С. 56–67.
- Бобошко М.Ю., Риехакайнен Е.И. *Речевая аудиометрия в клинической практике*. СПб.: Диалог, 2019. 80 с.
- Бобошко М.Ю., Савенко И.В., Гарбарук Е.С., Журавский С.Г., Мальцева Н.В., Бердникова И.П. *Практическая сурдология*. СПб.: Диалог, 2021. 420 с.
- Вайтулевич С.Ф., Петропавловская Е.А., Шестопалова Л.Б., Никитин Н.И. Функциональная межполушарная асимметрия мозга человека и слуховая функция. *Физиология человека*. 2019. Т. 45 (2). С. 103–114.  
<https://doi.org/10.1134/S0131164619020127>
- Выготский Л.С. *Мышление и речь*. Изд. 5, испр. М.: Лабиринт, 1999. 352 с.
- Гарбарук Е.С., Гойхбург М.В., Важибок А., Таварткиладзе Г.А., Павлов П.В., Кольмайер Б. Применение русскоязычной версии матричного фразового теста у детей. *Вестн. оториноларингологии*. 2020. Т. 85 (1). С. 34–39.  
<https://doi.org/10.17116/otorino20208501134>
- Ковязина М.С. *Нейропсихологический анализ патологии мозлистого тела*. 2-е изд. (эл.). М.: Генезис, 2016. 176 с.
- Кукс Е.Н., Рындина А.М., Исмагулова Ф.Ш., Лапина В.М. Тест чередующейся речи в оценке центральных нарушений слуховой системы. *Вестн. оториноларингологии*. 1988. № 6. С. 10–13.
- Лопотко А.И. *Сенсибилизированная речевая аудиометрия*. Пособие для врачей. СПб: СПбГМУ, 1999. 44 с.
- Огородникова Е.А., Столярова Э.И., Балякова А.А. Особенности слухоречевой сегментации у детей школьного возраста с нормальным слухом и нарушениями слуха и речи. *Сенсорные системы*. 2012. Т. 26 (1). Р. 20–31.
- Савенко И.В. Антенетальный онтогенез слуховой системы и ее дисфункция у детей, родившихся недоношенными (обзор литературы). *Folia Otorhinolaryngol. et Pathologiae Respiratoriae*. 2015. Т. 21 (4). С. 23–33.
- Семенович А.В. *Нейропсихологическая коррекция в детском возрасте. Метод замещающего онтогенеза*. Учебное пособие. 9-е изд. (эл.). М.: Генезис, 2017. 474 с.

- Чутко Л.С., Елецкая О.В. *Речевые нарушения у детей*. М., 2019. 448 с.
- Bellis T.J. *Assessment and management of central auditory processing disorders in the education: from science to practice*. 2nd. ed. Clifton Park, NY: Thomson Delmar Learning, 2003. 552 p.
- Bouyssi-Kobar M., Brossard-Racine M, Jacobs M., Mur-nick J., Chang T., Limperopoulos C. Regional micro-structural organization of the cerebral cortex is affected by preterm birth. *Neuroimage Clin*. 2018. V. 18. P. 871–880.  
<https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.03.020>
- Buss E., Porter H. L., Hall J.W., Grose, J.H. Gap detection in school-age children and adults: center frequency and ramp duration. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2017. V. 60 (1). P. 172–181.  
[https://doi.org/10.1044/2016\\_JSLHR-H-16-0010](https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-H-16-0010)
- Cone B., Whitaker R. Dynamics of infant cortical auditory evoked potentials (CAEPs) for tone and speech tokens. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol*. 2013. V. 77 (7). P. 1162–1173.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2013.04.030>
- Dias K.Z., Jutras B., Acrani I.O., Pereira L.D. Random Gap Detection Test (RGDT) performance of individuals with central auditory processing disorders from 5 to 25 years of age. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol*. 2012. V. 76 (2). P. 174–178.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2011.10.022>
- Dole M., Hoen M., Meunier F. Effect of contralateral noise on energetic and informational masking on speech-in-speech intelligibility. *Proc. INTERSPEECH 2009, 10th Ann. Conf. Intern. Speech Commun. Assoc., Brighton, United Kingdom, September 6–10, 2009*.  
<https://doi.org/10.21437/Interspeech.2009-51>
- Eggermont J.J., Moore J.K. Morphological and functional development of the auditory nervous system. *Human auditory development*. Werner L.A., Fay R.R., Popper A.N., Eds. Springer Science+Business Media, LLC, 2012. 284 p.
- Firszt J.B., Ulmer J.L., Gaggl W. Differential representation of speech sounds in the human cerebral hemispheres. *Anat. Rec. A Discov Mol. Cell Evol. Biol*. 2006. V. 288 (4). P. 345–357.  
<https://doi.org/10.1002/ar.a.20295>
- Graven S.N., Browne J.V. Auditory development in the fetus and infant. *Newborn Infant Nurs. Rev*. 2008. V. 8 (4). P. 187–193.  
<https://doi.org/10.1053/j.nainr.2008.10.010>
- Güntürkün O., Ströckens F., Ocklenburg S. Brain lateralization: a comparative perspective. *Physiol. Rev*. 2020. V. 100 (3). P. 1019–1063.  
<https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2019>
- Gutschalk A., Steinmann I. Stimulus dependence of contralateral dominance in human auditory cortex. *Hum. Brain Mapp*. 2015. V. 36 (3). P. 883–896.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.22673>
- Hugdahl K., Westerhausen R., Alho K., Medvedev S., Hämäläinen H. The effect of stimulus intensity on the right ear advantage in dichotic listening. *Neurosci. Lett*. 2008. V. 431 (1). P. 90–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.11.046>
- Inagaki M., Tomita Y., Takashima S., Ohtani K., Andoh G., Takeshita K. Functional and morphometrical maturation of the brainstem auditory pathway. *Brain Dev*. 1987. V. 9 (6). P. 597–601.  
[https://doi.org/10.1016/s0387-7604\(87\)80092-x](https://doi.org/10.1016/s0387-7604(87)80092-x)
- Isiklar S., Ozdemir S.T., Ozkaya G., Ozpar R. Three dimensional development and asymmetry of the corpus callosum in the 0–18 age group: A retrospective magnetic resonance imaging study. *Clin Anat*. 2023. V. 36 (4). P. 581–598.  
<https://doi.org/10.1002/ca.23996>
- Kaga K. (Ed.). *ABRs and electrically evoked ABRs in children* (Part of the book series: Modern Otolology and Neuro-tology). Tokyo: Springer Japan, 2022. 266 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-4-431-54189-9>
- Kawase T., Maki A., Kanno A., Nakasato N., Sato M., Kobayashi T. Contralateral white noise attenuates 40-Hz auditory steady-state fields but not N100m in auditory evoked fields. *Neuroimage*. 2012. V. 59 (2). P. 1037–1042.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.108>
- Keith R.W. Random Gap Detection Test, Auditec, St Louis (MO), 2002.
- Kelly A. Normative data for behavioural tests of auditory processing for New Zealand school children aged 7 to 12 years. *The Australian and New Zealand journal of audiology*. 2007. V. 29 (1). P. 60–64.  
<https://doi.org/10.1375/audi.29.1.60>
- Krizman J., Tierney A., Fitzroy A.B., Skoe E., Amar J., Kraus N. Continued maturation of auditory brainstem function during adolescence: A longitudinal approach. *Clin. Neurophysiol*. 2015. V. 126 (12). P. 2348–2355.  
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.01.026>
- Lebel C., Beaulieu C. Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood. *J. Neurosci*. 2011. V. 31 (30). P. 10937–10947.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5302-10.2011>
- Lebel C., Deoni S. The development of brain white matter microstructure. *Neuroimage*. 2018. V. 182. P. 207–218.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.097>
- Lewandowska M., Milner R., Ganc M., Włodarczyk E., Dołycka J., Skarżyński H. Development of central auditory processes in Polish children and adolescents at the age from 7 to 16 years. *Current Psychology*. 2023. V. 42 (5). P. 1789–1806.  
<https://doi.org/10.1007/s12144-021-01540-x>
- Litovsky R. Development of the auditory system. *Handbook of Clinical Neurology. The Human Auditory System*. Eds G.G. Celesia and G. Hickok. 2015. P. 55–72.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00003-2>
- Mattsson T.S., Follestad T., Andersson S., Lind O., Øygarden J., Nordgård S. Normative data for diagnosing auditory processing disorder in Norwegian children aged 7–12 years. *Int. J. Audiol*. 2018. V. 57 (1). P. 10–20.  
<https://doi.org/10.1080/14992027.2017.1366670>
- McDermott E.E., Smart J.L., Boiano J.A., Bragg L.E., Colton T.N., Hanson E.M., Emanuel D.C., Kelly A.S. Assessing auditory processing abilities in typically developing school-aged children. *J. Am. Acad. Audiol*. 2016. V. 27 (2). P. 72–84.  
<https://doi.org/10.3766/jaaa.14050>

- Moore J.K., Linthicum Jr. F.H. The human auditory system: A timeline of development. *Int. J. Audiol.* 2007. V. 46 (9). P. 460–478.  
<https://doi.org/10.1080/14992020701383019>
- Musiek F.E. Auditory neuroscience and diagnosis. In: Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder*. 2nd ed V.1. San Diego: Plural Publishing, 2014. 745 p.
- Musiek F.E., Chermak G.D. Psychophysical and behavioral peripheral and central auditory tests. In: *Handbook of Clinical Neurology. The Human Auditory System*. G.G. Celesia and G. Hickok (Eds). Elsevier B.V., 2015. P. 313–332.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00018-4>
- Neijenhuis K., Snik A., Priester G., van Kordenoordt S., van den Broek P. Age effects and normative data on a Dutch test battery for auditory processing disorders. *Int. J. Audiol.* 2002. V. 41 (6). P. 334–346.  
<https://doi.org/10.3109/14992020209090408>
- Ouyang M., Kang H., Detre J.A., Roberts T.P.L., Huang H. Short-range connections in the developmental connectome during typical and atypical brain maturation. *Neurosci Biobehav. Rev.* 2017. V. 83. P. 109–122.  
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.007>
- Parviainen T., Helenius P., Salmelin R. Children show hemispheric differences in the basic auditory response properties. *Hum. Brain Mapp.* 2019. V. 40 (9). P. 2699–2710.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.24553>
- Quinones J.F., Pavan T., Liu X., Thiel C.M., Heep A., Hildebrandt A. Fiber tracing and microstructural characterization among audiovisual integration brain regions in neonates compared with young adults. *Neuroimage*. 2022. V. 254. Article No. 119141.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119141>
- Rahimi V., Mohamadkhani G., Alaghand-Rad J., Kermani F.R., Nikfarjad H., Marofizade S. Modulation of temporal resolution and speech long-latency auditory-evoked potentials by transcranial direct current stimulation in children and adolescents with dyslexia. *Exp. Brain Res.* 2019. V. 237 (3). P. 873–882.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-019-05471-9>
- Scaioli V., Brinciotti M., Di Capua M., Lori S., Janes A., Pastorino G., Peruzzi C., Sergi P., Suppiej A. A multi-centre database for normative brainstem auditory evoked potentials (BAEPs) in children: methodology for data collection and evaluation. *Open Neurol. J.* 2009. N. 3. P. 72–84.  
<https://doi.org/10.2174/1874205X00903010072>
- Schochat E., Musiek F.E. Maturation of outcomes of behavioral and electrophysiologic tests of central auditory function. *J. Commun. Disord.* 2006. V. 39 (1). P. 78–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2005.10.001>
- Sharma M., Purdy S.C., Humburg P. Cluster analyses reveals subgroups of children with suspected auditory processing disorders. *Front. Psychol.* 2019. V. 10. Article No. 2481.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02481>
- Sharma M., Purdy S.C., Kelly A.S. Comorbidity of auditory processing, language, and reading disorders. *J. Speech Lang. Hear Res.* 2009. V. 52 (3). P. 706–722.  
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/07-0226\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/07-0226))
- Skoe E., Krizman J., Anderson S., Kraus N. Stability and plasticity of auditory brainstem function across the lifespan. *Cereb. Cortex.* 2015. V. 25 (6). P. 1415–1426.  
<https://doi.org/10.1093/cercor/bht311>
- Snowling M.J., Gooch D., McArthur G., Hulme C. Language skills, but not frequency discrimination, predict reading skills in children at risk of dyslexia. *Psychol. Sci.* 2018. V. 29 (8). P. 1270–1282.  
<https://doi.org/10.1177/0956797618763090>
- Thomason M.E., Brown J.A., Dassanayake M.T., Shastri R., Marusak H.A., Hernandez-Andrade E., Yeo L., Mody S., Berman S., Hassan S.S., Romero R. Intrinsic functional brain architecture derived from graph theoretical analysis in the human fetus. *PLoS One.* 2014. V. 9(5). Article No. e94423.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094423>
- Włodarczyk E.A., Szkiełkowska A., Skarżyński H., Miałkiewicz B., Skarżyński P.H. Reference values for psychoacoustic tests on Polish school children 7–10 years old. *PLoS One.* 2019. V. 14 (8). Article No. e0221689.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221689>
- Yamazaki H., Easwar V., Polonenko M.J., Jiwani S., Wong D.D.E., Papsin B.C., Gordon K.A. Cortical hemispheric asymmetries are present at young ages and further develop into adolescence. *Hum. Brain Mapp.* 2018. V. 39 (2). P. 941–954.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.23893>
- Zwislocki J.J. A Theory of Central Auditory Masking and Its Partial Validation. *J. Acoust. Soc. Am.* 1972. V. 52 (2). P. 644–659.  
<https://doi.org/10.1121/1.1913154>

## Psychoacoustic testing to assess the functional maturation of the central auditory system

I. V. Savenko<sup>a, #</sup>, E. S. Garbaruk<sup>a, b</sup>, and M. Yu. Boboshko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
 197022 St. Petersburg, L. Tolstogo st., 6–8, Russia

<sup>b</sup> St. Petersburg State Pediatric Medical University  
 194100 St. Petersburg, Lithuanian st., 2, Russia

<sup>#</sup>E-mail: irina@savenko.su

The age-appropriate development of the central auditory system is crucial for a child's normal auditory and speech development. If there are any issues with this development, it can lead to central auditory processing

disorders (APD) and problems with psychoverbal and general development. Psychoacoustic testing is an informative and accessible diagnostic tool for identifying signs of APD. This testing can be performed on children as young as four years old, provided there are normative data available for different age groups. The purpose of this study was to assess the functional state of the central auditory system using psychoacoustic methods in healthy children of different ages. *Materials & Methods.* We examined 125 healthy full-term children between the ages of 4 and 17 years who had normal peripheral hearing and no speech, language, cognitive, or academic problems. The children were divided into five age groups: 4–5 years 11 months, 6–7 years 11 months, 8–9 years 11 months, 10–11 years 11 months, and 12 years and older. In addition to traditional audiological examinations, all children underwent tests to assess the functional state of the central parts of the auditory system, including tests for the perception of rhythmic sequences of stimuli, Random Gap Detection Test, monaural low redundant speech testing in quiet and in noise, alternating binaural speech testing, dichotic digits test, and a simplified version of the Russian matrix sentence test in noise (RUMatrix). *The results* showed that the tests used were sensitive to the functional state of various structures of the central auditory system, and signs of maturation in the “bottom-up” direction were demonstrated as the children grew older. The rate of evolutionary processes varied depending on the age group of the subjects. It was also shown that the morphofunctional development of the central auditory system is not completed by adolescence. *Conclusion.* These findings can be used to differentiate between the immaturity of the central auditory system, APD, and speech-language disorders of different types in children of different ages. Overall, this study emphasizes the importance of early detection and intervention for any issues related to the central auditory system in children.

*Key words:* central auditory processing, children, maturation of the central auditory system, central auditory processing disorders, auditory temporal analysis, speech tests

## REFERENCES

- Boboshko M.Yu., Kalmykova I.V., Garbaruk E.S., Kibalova Yu.S., Savenko I.V. *Sovremennye aspekty detskoj rechevoi audiometrii* [Modern approach in the children speech audiometry]. *Sensornye sistemy* [Sensory system]. 2010. V. 24 (4). P. 305–313 (in Russian).
- Boboshko M.Yu. *Rechevaya audiometriya. Uchebnoe posobie* [Speech audiometry. Handbook]. SPb: Izd-vo SPbGMU [SPb: SPbSMU Press], 2012. 64 p. (in Russian).
- Boboshko M.Yu., Salakhibekov M.A., Zhilinskaia E.V., Maltseva N.V., Savenko I.V., Totoljan N.A. *Audiologicheskaya ocenka sostoyaniya centralnykh otdelov sluchovoi sestemy pri rasseyennom skleroze* [Audiological assessment of the central auditory pathways in patients with multiple sclerosis]. *Folia Otorhinolaryngol. et Pathologiae Respiratoriae*. 2016. V. 22 (4). P. 56–67 (in Russian).
- Boboshko M.Yu., Riekhakainen E.I. *Rechevaya audiometriya v klinicheskoi praktike* [Speech audiometry in clinical practice]. SPb.: Dialog, 2019. 80 p. (In Russian).
- Boboshko M.Yu., Savenko I.V., Garbaruk E.S., Zhuravskii S.G., Mal'tseva N.V., Berdnikova I.P. *Prakticheskaya surdologiya* [Practical audiology]. SPb: Dialog, 2021. 420 p. (in Russian).
- Vaitulevich S.F., Petropavlovskaya E.A., Shestopalova L.B., Nikitina N.I. *Funkcionalnaya mezpoluschnaya asimmetriya mozga cheloveka i sluchovaya funkciya* [Functional hemispheric asymmetry of the human brain in audition]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2019. V. 45 (2). P. 103–114. <https://doi.org/10.1134/S0131164619020127> (in Russian).
- Vygotskii L.S. *Myshlenie i rech'*. Izd. 5, ispr. [Thinking and speech. Rev. 5th ed.]. M.: Labirint, 1999. 352 p. (in Russian).
- Garbaruk E.S., Goykhuburg M.V., Warzybok A., Tavartkiladze G.A., Pavlov P.V., Kollmeier B. *Primenenie russkoj zuchnoi versii matriksnogo frazovogo testa u detei* [Application of the matrix sentence test Russian version in children]. *Vestnik otorinolaringologii* [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 2020. V. 85 (1): 34–39. <https://doi.org/10.17116/otorino20208501134> (in Russian).
- Kovyazina M.S. *Neiropsikhologicheskii analiz patologii mozolista tela*. [Neuropsychological analysis of the corpus callosum pathology]. 2nd ed. M.: Genezis, 2016. 176 p. (in Russian).
- Kuks E.N., Ryndina A.M., Ismagulova F.Sh., Lapina V.M. *Test chereduyushchey rechi v otsenke tsentral'nykh narushenii slukhovoї sestemy* [Binaural fusion test in the assessment of central auditory system disorders]. *Vestnik Otorinolaringologii* [Bulletin of Otorhinolaryngology]. 1988. N. 6. P. 10–13. (in Russian).
- Lopotko A.I. *Sensibilizirovannaya rechevaya audiometriya. Posobie dlya vrachei* [Sensitized speech audiometry. Manual for doctors]. SPb: SPbGMU [SPb: SPbSMU Press], 1999. 44 p. (in Russian).
- Ogorodnikova E.A., Stoliarova E.I., Baliakova A.A. *Osobennosti sluchorechevoi segmentatsii u detei shkol'nogo vozrasta s normal'nym sluchom i narusheniyami slucha i rechi* [Auditory segmentation in schoolchildren with normal hearing and with hearing and speech impairments]. *Sensornye sistemy* [Sensory system]. 2012. V. 26 (1): 20–31 (in Russian).
- Savenko I.V. *Antenatal'naya ontogenez sluchovoi sestemy i ee disfunkciya u detei, rodivshichis' nedonoschennymi* [Antenatal ontogenesis of the auditory system and its dysfunction in children born preterm (literature review)]. *Folia Otorhinolaryngol. et Pathologiae Respiratoriae*. 2015. V. 21 (4). P. 23–33 (in Russian).
- Semenovich A.V. *Neiropsikhologicheskaya korrektsiya v detskom vozraste. Metod zameshchayushchego ontogeneza*. [Neuropsychological correction in childhood. The method of replacement ontogenesis. Manual. 9th ed.]. M.: Genezis, 2017. 474 p. (in Russian).

- Chutko L.S., Eletskaia O.V. *Rechevye narusheniya u detei* [Speech disorders in children]. M., 2019. 448 p. (in Russian).
- Bellis T.J. *Assessment and management of central auditory processing disorders in the education: from science to practice*. 2nd. ed. Clifton Park, NY: Thomson Delmar Learning, 2003. 552 p.
- Bouyssi-Kobar M., Brossard-Racine M., Jacobs M., Murnick J., Chang T., Limperopoulos C. Regional microstructural organization of the cerebral cortex is affected by preterm birth. *Neuroimage Clin.* 2018. V. 18. P. 871–880. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.03.020>
- Buss E., Porter H.L., Hall J.W., Grose J.H. Gap detection in school-age children and adults: center frequency and ramp duration. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research.* 2017. V. 60 (1). P. 172–181. [https://doi.org/10.1044/2016\\_JSLHR-H-16-0010](https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-H-16-0010)
- Cone B., Whitaker R. Dynamics of infant cortical auditory evoked potentials (CAEPs) for tone and speech tokens. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2013. V. 77 (7). P. 1162–1173. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2013.04.030>
- Dias K.Z., Jutras B., Acrani I.O., Pereira L.D. Random Gap Detection Test (RGDT) performance of individuals with central auditory processing disorders from 5 to 25 years of age. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2012. V. 76 (2). P. 174–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2011.10.022>
- Doel M., Hoen M., Meunier F. Effect of contralateral noise on energetic and informational masking on speech-in-speech intelligibility. Proceeding of INTERSPEECH 2009, 10th Annual Conference of the International Speech Communication Association, Brighton, United Kingdom, September 6–10, 2009. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2009-51>
- Eggermont J.J., Moore J.K. Morphological and functional development of the auditory nervous system. In: *Human auditory development*. Werner L.A., Fay R.R., Popper A.N., Eds. Springer Science+Business Media, LLC, 2012. 284 p.
- Firszt J.B., Ulmer J.L., Gaggl W. Differential representation of speech sounds in the human cerebral hemispheres. *Anat. Rec. A Discov Mol. Cell Evol. Biol.* 2006. V. 288 (4). P. 345–357. <https://doi.org/10.1002/ar.a.20295>
- Graven S.N., Browne J.V. Auditory development in the fetus and infant. *Newborn Infant Nurs. Rev.* 2008; 8 (4): 187–193. <https://doi.org/10.1053/j.nainr.2008.10.010>
- Güntürkün O., Ströckens F., Ocklenburg S. Brain lateralization: a comparative perspective. *Physiol. Rev.* 2020. V. 100 (3). P. 1019–1063. <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2019>
- Gutschalk A., Steinmann I. Stimulus dependence of contralateral dominance in human auditory cortex. *Hum. Brain Mapp.* 2015. V. 36 (3). P. 883–896. <https://doi.org/10.1002/hbm.22673>
- Hugdahl K., Westerhausen R., Alho K., Medvedev S., Hämäläinen H. The effect of stimulus intensity on the right ear advantage in dichotic listening. *Neurosci. Lett.* 2008. V. 431 (1). P. 90–94. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.11.046>
- Inagaki M., Tomita Y., Takashima S., Ohtani K., Andoh G., Takeshita K. Functional and morphometrical maturation of the brainstem auditory pathway. *Brain Dev.* 1987. V. 9 (6). P. 597–601. [https://doi.org/10.1016/s0387-7604\(87\)80092-x](https://doi.org/10.1016/s0387-7604(87)80092-x)
- Isiklar S., Ozdemir S.T., Ozkaya G., Ozpar R. Three-dimensional development and asymmetry of the corpus callosum in the 0-18 age group: A retrospective magnetic resonance imaging study. *Clin Anat.* 2023. V. 36 (4). P. 58-1-598. <https://doi.org/10.1002/ca.23996>
- Kaga K. (Ed.). *ABRs and electrically evoked ABRs in children* (Part of the book series: Modern Otology and Neurotology). Tokyo: Springer Japan, 2022. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54189-9>
- Kawase T., Maki A., Kanno A., Nakasato N., Sato M., Kobayashi T. Contralateral white noise attenuates 40-Hz auditory steady-state fields but not N100m in auditory evoked fields. *Neuroimage.* 2012. V. 59 (2). P. 1037–1042. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.108>
- Keith R.W. Random Gap Detection Test, Auditec, St Louis (MO), 2002.
- Kelly A. Normative data for behavioural tests of auditory processing for New Zealand school children aged 7 to 12 years. *The Australian and New Zealand journal of audiology.* 2007. V. 29 (1). P. 60–64. <https://doi.org/10.1375/audi.29.1.60>
- Krizman J., Tierney A., Fitzroy A.B., Skoe E., Amar J., Kraus N. Continued maturation of auditory brainstem function during adolescence: A longitudinal approach. *Clin. Neurophysiol.* 2015. V. 126 (12). P. 2348–2355. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.01.026>
- Lebel C., Beaulieu C. Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood. *J. Neurosci.* 2011. V. 31 (30). P. 10937–10947. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5302-10.2011>
- Lebel C., Deoni S. The development of brain white matter microstructure. *Neuroimage.* 2018. V. 182. P. 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.097>
- Lewandowska M., Milner R., Ganc M., Włodarczyk E., Dołycka J., Skarżyński H. Development of central auditory processes in Polish children and adolescents at the age from 7 to 16 years. *Current Psychology.* 2023. V. 42 (5). P. 1789–1806. <https://doi.org/10.1007/s12144-021-01540-x>
- Litovsky R. Development of the auditory system. *Handbook of Clinical Neurology. The Human Auditory System*. Eds G.G. Celesia and G. Hickok. 2015. P. 55–72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00003-2>
- Mattsson T.S., Follestad T., Andersson S., Lind O., Øygarden J., Nordgård S. Normative data for diagnosing auditory processing disorder in Norwegian children aged 7-12 years. *Int. J. Audiol.* 2018. V. 57 (1). P. 10–20. <https://doi.org/10.1080/14992027.2017.1366670>
- McDermott E.E., Smart J.L., Boiano J.A., Bragg L.E., Colton T.N., Hanson E.M., Emanuel D.C., Kelly A.S. Assessing auditory processing abilities in typically developing school-aged children. *J. Am. Acad. Audiol.* 2016. V. 27 (2). P. 72–84. <https://doi.org/10.3766/jaaa.14050>
- Moore J.K., Linthicum Jr. F.H. The human auditory system: A timeline of development. *Int. J. Audiol.* 2007.

- V. 46 (9). P. 460–478.  
<https://doi.org/10.1080/14992020701383019>
- Musiek F.E. Auditory neuroscience and diagnosis. In: Musiek F.E., Chermak G.D. *Handbook of central auditory processing disorder*. 2nd ed V.1. San Diego: Plural Publishing, 2014. 745 p.
- Musiek F.E., Chermak G.D. Psychophysical and behavioral peripheral and central auditory tests. In: *Handbook of Clinical Neurology*. V. 129 (3rd series) *The Human Auditory System*. G.G. Celesia and G. Hickok (Eds). Elsevier B.V., 2015. P. 313–332.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00018-4>
- Neijenhuis K., Snik A., Priester G., van Kordenoordt S., van den Broek P. Age effects and normative data on a Dutch test battery for auditory processing disorders. *Int. J. Audiol.* 2002. V. 41 (6). P. 334–346.  
<https://doi.org/10.3109/14992020209090408>
- Ouyang M., Kang H., Detre J.A., Roberts T.P.L., Huang H. Short-range connections in the developmental connectome during typical and atypical brain maturation. *Neurosci Biobehav. Rev.* 2017. V. 83. P. 109–122.  
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.007>
- Parviainen T., Helenius P., Salmelin R. Children show hemispheric differences in the basic auditory response properties. *Hum. Brain Mapp.* 2019. V. 40 (9). P. 2699–2710. <https://doi.org/10.1002/hbm.24553>
- Quinones J.F., Pavan T., Liu X., Thiel C.M., Heep A., Hildebrandt A. Fiber tracing and microstructural characterization among audiovisual integration brain regions in neonates compared with young adults. *Neuroimage*. 2022. V. 254. Article No. 119141.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119141>
- Rahimi V., Mohamadkhani G., Alagband-Rad J., Kermani F.R., Nikfarjad H., Marofizade S. Modulation of temporal resolution and speech long-latency auditory-evoked potentials by transcranial direct current stimulation in children and adolescents with dyslexia. *Exp. Brain Res.* 2019. V. 237 (3). P. 873–882.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-019-05471-9>
- Scaiola V., Brinciotti M., Di Capua M., Lori S., Janes A., Pastorino G., Peruzzi C., Sergi P., Suppiej A. A multi-centre database for normative brainstem auditory evoked potentials (BAEPs) in children: methodology for data collection and evaluation. *Open Neurol. J.* 2009. N. 3. P. 72–84.  
<https://doi.org/10.2174/1874205X00903010072>
- Schochat E., Musiek F.E. Maturation of outcomes of behavioral and electrophysiologic tests of central auditory function. *J. Commun. Disord.* 2006. V. 39 (1). P. 78–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2005.10.001>
- Sharma M., Purdy S.C., Humburg P. Cluster analyses reveals subgroups of children with suspected auditory processing disorders. *Front. Psychol.* 2019. V. 10. Article No. 2481. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02481>
- Sharma M., Purdy S.C., Kelly A.S. Comorbidity of auditory processing, language, and reading disorders. *J. Speech Lang. Hear Res.* 2009. V. 52 (3). P. 706–722.  
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/07-0226\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/07-0226))
- Skoe E., Krizman J., Anderson S., Kraus N. Stability and plasticity of auditory brainstem function across the lifespan. *Cereb. Cortex.* 2015. V. 25 (6). P. 1415–1426.  
<https://doi.org/10.1093/cercor/bht311>
- Snowling M.J., Gooch D., McArthur G., Hulme C. Language skills, but not frequency discrimination, predict reading skills in children at risk of dyslexia. *Psychol. Sci.* 2018. V. 29 (8). P. 1270–1282.  
<https://doi.org/10.1177/0956797618763090>
- Thomason M.E., Brown J.A., Dassanayake M.T., Shastri R., Marusak H.A., Hernandez-Andrade E., Yeo L., Mody S., Berman S., Hassan S.S., Romero R. Intrinsic functional brain architecture derived from graph theoretical analysis in the human fetus. *PLoS One.* 2014 V. 9 (5). Article No. e94423.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094423>
- Włodarczyk E.A., Szkiełkowska A., Skarżyński H., Miałkiewicz B., Skarżyński P.H. Reference values for psychoacoustic tests on Polish school children 7–10 years old. *PLoS One.* 2019. V. 14 (8). Article No. e0221689.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221689>
- Yamazaki H., Easwar V., Polonenko M.J., Jiwani S., Wong D.D.E., Papsin B.C., Gordon K.A. Cortical hemispheric asymmetries are present at young ages and further develop into adolescence. *Hum. Brain Mapp.* 2018. V. 39 (2). P. 941–954.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.23893>
- Zwislocki J.J. A Theory of Central Auditory Masking and Its Partial Validation. *J. Acoust. Soc. Am.* 1972. V. 52 (2). P. 644–659. <https://doi.org/10.1121/1.1913154>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.858.4+616.28-76+616.28-072:616.283.1-089.843

# ТРУДНОСТИ КОХЛЕАРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ПРИ ПОРОКАХ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННЕГО УХА

© 2023 г. Н. Т. Тунян<sup>1,\*</sup>, Е. В. Бычкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра Оториноларингологии и офтальмологии, 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 8а, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский детский городской сурдологический центр, 194356 Санкт-Петербург, ул. Есенина, д. 26 корп. 4, Россия

\*E-mail: nairanit@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2023 г.

После доработки 27.07.2023 г.

Принята к публикации 18.09.2023 г.

По данным различных авторов, у 20% детей с сенсоневральной тугоухостью или глухотой по результатам компьютерной томографии определяются аномалии строения височных костей. Кохлеарная имплантация при наличии кохлеовестибулярных аномалий сопряжена с рядом трудностей. К ним относятся особенности выполнения кохлеостомии и размещения электрода внутри улитки, риск повреждения лицевого нерва из-за его аномального расположения и его аберрантная стимуляция в послеоперационном периоде, интраоперационная ликворея, что может привести к развитию бактериального менингита в послеоперационном периоде, а также опасность проникновения электрода во внутренний слуховой проход. В данной работе представлен наш способ выполнения кохлеарной имплантации при аномалии развития внутреннего уха – общей полости. Способ расширяет возможности кохлеарной имплантации для восстановления слухового восприятия у пациентов с данной патологией.

*Ключевые слова:* кохлеарная имплантация, аномалии внутреннего уха, общая полость, кохлеостома

**DOI:** 10.31857/S0235009223040091, **EDN:** QJZMAM

### ВВЕДЕНИЕ

Кохлеарная имплантация (КИ) является одним из самых эффективных методов реабилитации пациентов с сенсоневральной глухотой. По данным различных авторов, у 20% детей с сенсоневральной тугоухостью или глухотой по результатам компьютерной томографии определяются аномалии строения височных костей (Jackler et al., 1987; 1989; Papsin, 2005). Такие аномалии могут сопровождаться нарушениями слуховой функции в различной степени, разными уровнями прогрессирования заболевания с наличием или отсутствием аномалий развития других органов и систем (Park et al., 2000). Слухоречевая реабилитация у детей с аномалиями развития внутреннего уха, в частности улитки, после кохлеарной имплантации также может иметь ряд сложностей и более низкую эффективность в отношении качества восприятия речи и других звуков, длительности курса и другое.

Считается, что аномалии улитки являются результатом торможения эмбриогенеза, аномального ее развития во время отдельных этапов внутриутробного периода или генетических дефектов

(Sennaroglu et al., 2002; Tucci et al., 1995). Также известно, что может происходить инактивация одного или нескольких генов, которые являются ответственными за нормальное развитие внутреннего уха (Morsli et al., 1999).

Наиболее признанными классификациями кохлеовестибулярных аномалий в мировой оториноларингологии и отонейрохирургии считаются классификации, предложенные Р. Джеклером (США) и Л. Сеннароглу (Турция). Первая классификация (по Р. Джеклеру) основана на данных, полученных при КТ обследовании височных костей (Jackler et al., 1987; 1989). Вторая – представляет кохлеарные мальформации, которые автором Л.Сеннароглу разделены по степени выраженности на шесть категорий в зависимости от времени нарушения нормального хода эмбрионального развития (Sennaroglu et al., 2002). Эта классификация аномалий развития улитки включает неполное разделение I и II типов. В данной работе мы опираемся на классификацию по Р. Джеклеру (табл. 1).

В свете выполнения кохлеарной имплантации большой интерес в данной классификации пред-

**Таблица 1.** Классификация аномалий развития внутреннего уха по Р. Джеклеру

<b>Аплазия или мальформации улитки</b>	
<b>Категория А</b>	Аплазия лабиринта (аномалия Michel)
	Аплазия улитки, нормальное или деформированное преддверие и система полукружных каналов
	Гипоплазия улитки, нормальное или деформированное преддверие и система полукружных каналов
	Неполная улитка, нормальное или деформированное преддверие и система полукружных каналов (аномалия Mondini)
	Общая полость: улитка и преддверие представлены единым пространством без внутренней архитектуры, нормальная или деформированная система полукружных каналов
<b>Нормальная улитка</b>	
<b>Категория В</b>	Дисплазия преддверия и латерального полукружного канала, нормальные передний и задний полукружные каналы
	Расширенный водопровод преддверия, нормальное или расширенное преддверие, нормальная система полукружных каналов

ставляет категория А: аплазия и мальформации улитки. В первых двух случаях аплазий проведение кохлеарной имплантации невозможно. Единственным способом помочь пациенту с такой патологией может стволомозговая имплантация.

При компьютерной томографии в гипоплазии улитки различают три ее типа. Улитка, как правило, сохраняет внутреннюю архитектуру, но при этом уменьшена в своем размере: I тип – почкообразная; II тип – мешкообразная; III тип – улитка с 1.5 завитками. Третий тип гипоплазии очень часто путают с аномалией Мондини.

В неполном разделении улитки различают также три типа: I тип – отсутствует модиолус и межлестничные перегородки; II тип – определяется наличием только базальной части модиолуса (аномалия Мондини); III тип – отсутствует модиолус, присутствует межлестничная перегородка (описан в случае X-сцепленной глухоты).

В общей полости, как правило, улитка и преддверие представлены единой полостью, имеющей овальную или круглую форму.

Кохлеарная имплантация при наличии кохлеовестибулярных аномалий сопряжена с рядом трудностей. К ним относятся особенности выполнения кохлеостомии и размещения электрода внутри улитки, риск повреждения лицевого нерва из-за его аномального расположения, интраоперационная ликворея, что может привести к развитию бактериального менингита в послеоперационном периоде, а также опасность проникновения электрода во внутренний слуховой проход.

Трудности могут возникнуть и в послеоперационном периоде во время реабилитации. По данным некоторых исследователей, у 80% (8 из 10) пациентов с пороками развития улитки была отмечена индуцируемая стимуляция лицевого нерва

(Papsin, 2005; Rah et al., 2016). Наличие аномалий улитки является фактором риска aberrантной стимуляции лицевого нерва, препятствующим программированию оптимальных уровней стимуляции, по сравнению с детьми с нормальной улиткой (Aljazeera et al., 2021). Аномальный ход лицевого нерва, проходящий вблизи овального окна или по промонториуму, часто сопровождается те или иные пороки внутреннего уха и влияет на установку электродной решетки. Кроме того, у детей с аномалией развития внутреннего уха описаны случаи стимуляции лицевого нерва в результате эксплуатации кохлеарного импланта (Кузовков и др., 2022). Эти аномалии осложняют условия проведения кохлеарной имплантации в целях восстановления слухового восприятия у пациентов. Для преодоления этой проблемы нами был предложен оригинальный способ наложения кохлеостомы и введения электродной решетки, который был успешно применен в клинической практике.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

*Общая клиническая практика.* Из 845 проведенных нами кохлеарных имплантаций почти 800 операций было выполнено детям. При этом у 27 детей были выявлены различные пороки развития внутреннего уха. У 21 из них в порок развития внутреннего уха была вовлечена улитка: у 14 детей выявлено неполное разделение улитки II типа (аномалия Mondini), у одного ребенка – неполное разделение улитки III типа, у четырех детей – гипоплазия улитки, у двоих – общая полость. В двух случаях в послеоперационном периоде наблюдался переходящий парез лицевого нерва, который восстановился после проведения соответствующей терапии. В четырех случаях – интраоперационная ликворея, которая была

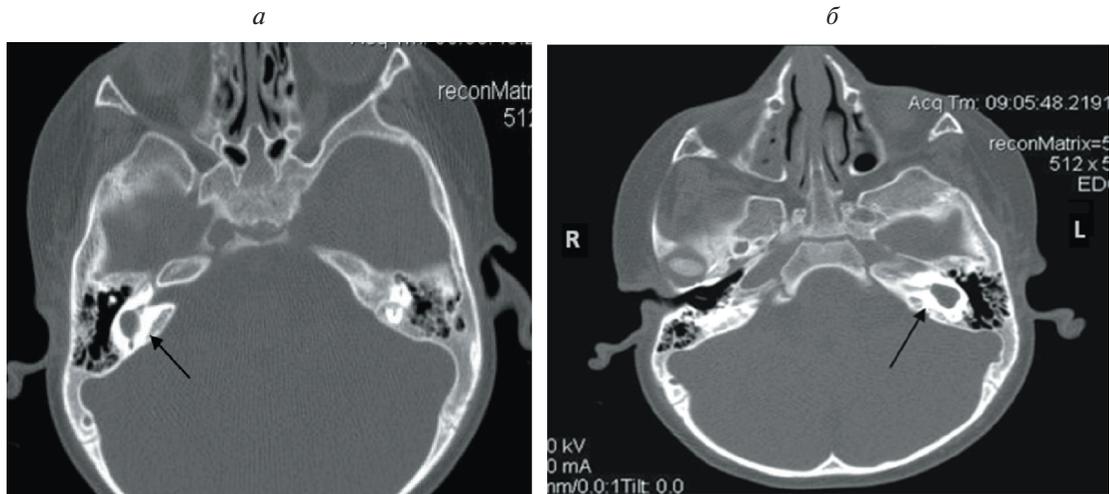


Рис. 1. Компьютерная томография ребенка Т. Аномалия внутреннего уха — общая полость (а — справа, б — слева).

устранена после непосредственного введения всей активной части электрода в улитку путем тампонирования окна улитки или кохлеостомы фрагментами мышечно-фасциальных лоскутов.

Наиболее интересным случаем в контексте данной работы был клинический случай с пороком внутреннего уха — общей полостью, где впервые был применен предлагаемый нами оригинальный способ наложения кохлеостомы и введения электродной решетки.

*Клинический случай.* В клинику обратились родители пациентки Т. с жалобами на отсутствие у трехлетнего ребенка реакции на звуки и речи. Ребенок (IV беременность без осложнений, наследственность не отягощена) родился в срок, его вес при рождении составлял 2980 г.

В ходе обследования был установлен диагноз: хроническая двусторонняя сенсоневральная тугоухость IV степени, врожденной этиологии; вторичное расстройство рецептивной и экспрессивной речи. Кроме того, наблюдались: последствия перинатального поражения ЦНС; синдром двигательных нарушений; атонически-астатический синдром; темповая задержка психомоторного развития.

Со слов мамы девочка поздно стала держать голову (в 6 мес), сидеть (в 9–10 мес), ходить (около двух лет). С шести месяцев находилась на «Д» учете у ЛОР, невролога, сурдолога и педиатра. В возрасте 1.4 года была бинаурально слухопротезирована сверхмощными слуховыми аппаратами, которые не оказали положительного эффекта на слуховое восприятие. По данным аудиологического обследования коротколатентные слуховые вызванные потенциалы определялись справа при стимуляции в 90 дБ, слева — V пик не регистрировался при максимальной стимуляции в 100 дБ.

Отоакустическая эмиссия не была зарегистрирована с обеих сторон.

Компьютерная томография височных костей (рис. 1, а, б) выявила рудиментарно измененные улитки с обеих сторон, полукружные каналы дифференцировались неотчетливо и сливались с расширенным преддверием — внутренне ухо с обеих сторон было представлено единой полостью неправильной формы размерами справа  $10.3 \times 7.2$  мм, слева —  $12.6 \times 6.9$  мм.

Цепи слуховых косточек не были нарушены. Внутренний слуховой проход диаметром справа 1.4–2.7 мм, слева — 3.3 мм.

В связи с выявленными на КТ изменениями височных костей было принято решение о проведении дополнительного МРТ головного мозга и внутреннего уха (рис. 2).

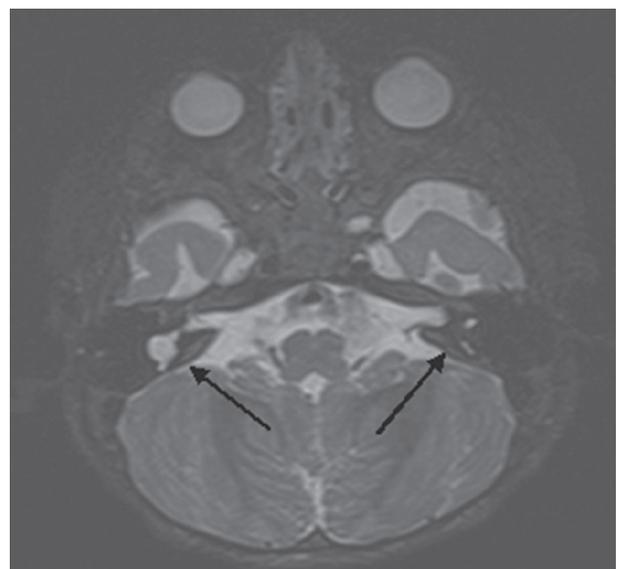
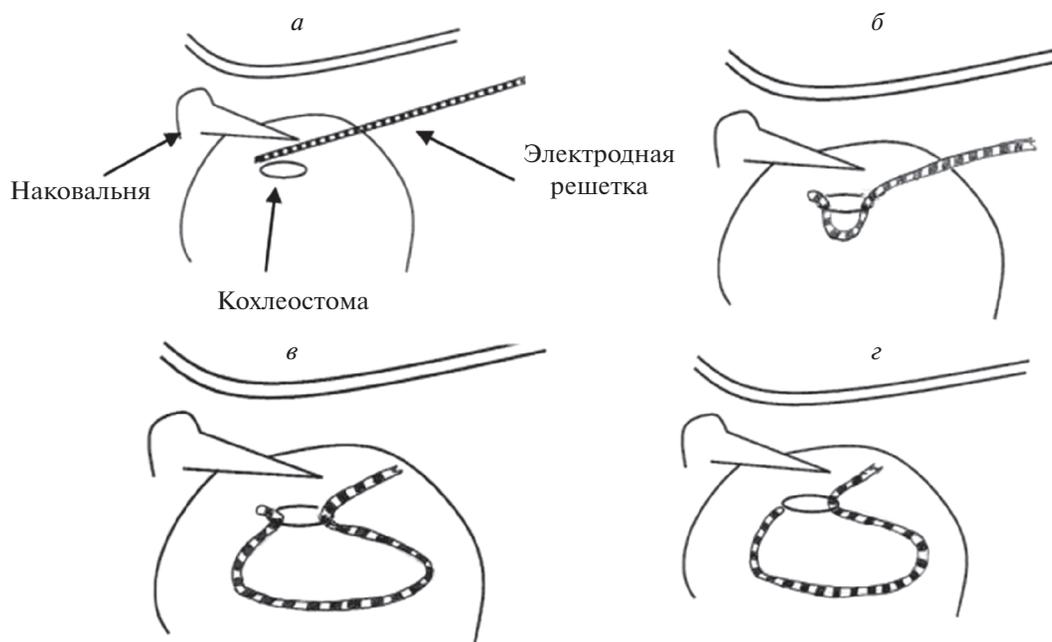


Рис. 2. МРТ-обследование ребенка Т.



**Рис. 3.** Схематичное изображение этапов введения электродной решетки после наложения кохлеостомы (*а* – формирование кохлеостомы; *б, в, з* – этапы постепенного введения электродной решетки).

По его результатам с двух сторон были выявлены МР-признаки рудиментарных улиток с частично сформированными полукружными каналами, с наличием асимметрии внутренних слуховых проходов. С двух сторон отмечалось и наличие вестибуло-кохлеарных нервов, отходящих от ствола мозга. Однако на уровне пирамиды височных костей тканевая структура прослеживалась четче справа, чем слева. Учитывая эти результаты МРТ, было принято решение о проведении правосторонней кохлеарной имплантации (правое ухо).

#### ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ КОХЛЕАРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Под общим эндотрахеальным наркозом после инфильтрации мягких тканей физиологическим раствором с добавлением адреналина был выполнен S-образный разрез в заушной области. Сформированы и отслоены кожные и мышечно-надкостничные лоскуты. Борами выполнена мастоидэктомия. Короткий отросток наковальни был обнаружен в типичном месте *aditus ad antrum*. На этом же уровне на медиальной стенке барабанной полости определялся бугор общей полости внутреннего уха (рис. 3, *а*).

Было принято решение вскрыть полость там же, не прибегая к задней тимпанотомии, чтобы избежать риска травмирования лицевого нерва, так как его аномальное расположение не было исключено.

Борами было подготовлено ложе для имплантата и отверстия для его крепления. Алмазным бором (1.2 мм) вскрыта общая полость, выполнена кохлеостома. Форма кохлеостомы была овальной, а не традиционно круглой. Такой вид наложения кохлеостомы был обозначен нами способом “почтового ящика” (“post box”). В момент вскрытия общей полости и на дальнейших этапах операции ликворея не наблюдалась. Затем был установлен имплантат с прямой электродной решеткой CI24RE (ST) (Cochlear, Австралия). При этом электрод вводился в полость петлевым способом: удерживая свободный конец, петлю постепенно проталкивали в полость (рис. 3, *б, в*). После достижения максимального ведения, свободный конец был отпущен в полость улитки (*з*).

В результате удалось ввести 19 электродов из 22. Проведение интраоперационного тестирования имплантированного устройства – телеметрия нервного ответа (NRT) показала, что положительный ответ получен на 16 каналах электрода из 22. Послеоперационная трансорбитальная рентгенография улиток выявила, что активный электрод имплантата находится в общей полости (рис. 4). Таким образом, операция кохлеарной имплантации была успешно выполнена.

После операции ребенок совместно с сурдологом и сурдопедагогом прошел курс слухоречевой реабилитации. Результаты отдаленного наблюдения показали, что слухопротезирование пациента оказалось эффективным. В процессе коррекционно-педагогической работы у девочки сформирова-

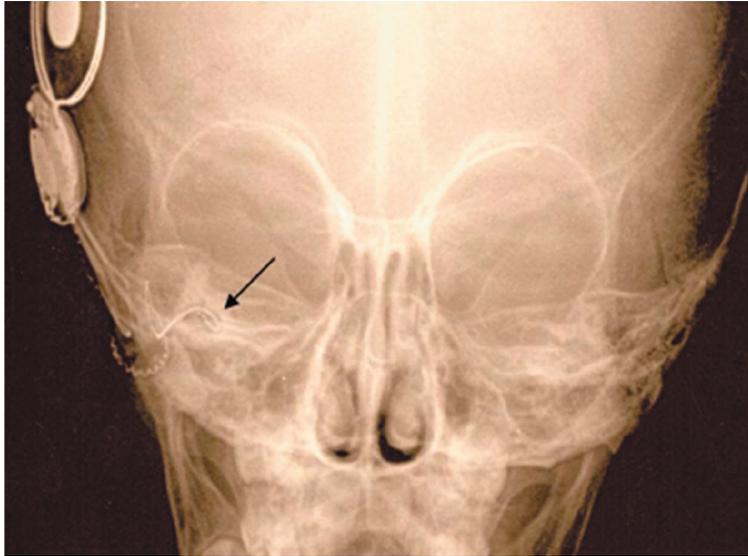


Рис. 4. Интраоперационная рентгенография. Электрод в общей полости.

ровалось адекватное слухоречевое поведение, позволяющее ей активно использовать развивающиеся слуховые ощущения для восприятия, понимания и воспроизведения устной речи. В настоящее время она успешно учится в общеобразовательной школе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая анатомические особенности внутреннего уха ребенка, интерес данного случая заключается в предлагаемом способе выполнения кохлеарной имплантации, а именно в способе наложения кохлеостомы (“post box”) и в способе введения электродной решетки. Важно отметить, что при подобных пороках развития внутреннего уха следует применять кохлеарные импланты с прямой электродной решеткой. По нашему мнению, благодаря этим условиям, были получены вышеуказанные интраоперационные результаты и удалось избежать возможных осложнений, таких как ликворея, повреждение лицевого нерва и его аберрантной стимуляция в послеоперационном периоде. Также была достигнута и основная цель — успешная слухоречевая реабилитация.

#### УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Н.Т. Туянн проделаны поисково-аналитическая работа, написание статьи, проведение исследования, Е.В. Бычковой выполнены написание статьи и проведение исследования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузовков В.Е., Лиленко А.С., Сугарова С.Б., Тамасчишина В.А., Каляпин Д.Д., Луппов Д.С. Факторы риска стимуляции лицевого нерва у пользователей кохлеарных имплантов: наш опыт. *Российская оториноларингология*. 2022. 5 (120). С. 116–121. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-5-116-121>
- Aljazeera I.A., Khurayzi T., Al-Amro M., Alzhvani F., Alsanosi A. Evaluation of computed tomography parameters in patients with facial nerve stimulation post-cochlear implantation. *Eur Arch Otorhinolaryngology*. 2021. V. 278 (10). P. 3789–3794. <https://doi.org/10.1007/s00405-020-06486-7>
- Jackler R.K., A. De La Cruz. The large vestibular aqueduct syndrome. *Laryngoscope*. 1989. V. 99 (10). P. 1238–1243.
- Jackler R.K., Luxford W.M., House W.F. Congenital malformations of the inner ear: a classification based on embryogenesis. *Laryngoscope*. 1987. V. 97 (1). P. 1–14.
- Morsli H., Tuorto F., Choo D. et al. Otx1 and Otx2 activities are required for the normal development of the mouse inner ear. *Development*. 1999. P. 2335–2343. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10225993/>
- Papsin B.C. Cochlear implantation in children with anomalous cochleovestibular anatomy. *Laryngoscope*. 2005. V. 115 (1 Pt. 2 Suppl 106). P. 1–26. <https://doi.org/10.1097/00005537-200501001-00001>
- Park A., Kou B., Hotaling A. Clinical course of pediatric congenital inner ear malformations. *Laryngoscope*. 2000. P. 1715–1719.
- Rah Y.C., Yoon Y.S., Chang M.Y., Lee J.Y., Suh M.W., Lee J.H. Facial nerve stimulation in the narrow bony cochlear nerve canal after cochlear implantation. *Laryngoscope*. 2016. V. 126 (6). P. 1433–1439. <https://doi.org/10.1002/lary.25655>
- Sennaroglu L., Saatci I. A new classification for cochleovestibular malformations. *Laryngoscope*. 2002. V. 112 (12). P. 2230–2241.
- Tucci D., Telian S., Zimmerman-Philips S. Cochlear implantation in patients with cochlear malformations. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 1995. P. 833–838.

## Difficulties of Cochlear implantation in malformations of the inner ear

N. T. Tunyan<sup>a,#</sup> and E. V. Bychkova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> St. Petersburg State University, Department of Otorhinolaryngology and Ophthalmology  
199106 St. Petersburg, 21st line of V.I., h. 8a, Russia

<sup>b</sup> Audiology City Center for children in St. Petersburg  
194356 St. Petersburg, Esenin st., h. 26 building 4, Russia

#E-mail: nairanit@mail.ru

According to various authors, 20% of children with sensorineural hearing loss or deafness, anomalies in the structure of the temporal bones are determined according to the results of computed tomography. Cochlear implantation in the presence of cochleovestibular malformations is associated with a number of difficulties. These include the peculiarities of cochleostomy and placing of the electrode inside the cochlea, the risk of damage to the facial nerve due to its abnormal location, intraoperative liquorrhea, which can lead to the development of bacterial meningitis in the postoperative period, as well as the risk of penetration of the electrode into the internal auditory canal. In this research, we present our method of performing cochlear implantation in case of a malformation in the development of the inner ear (common cavity). The method expands the possibilities of cochlear implantation for auditory perception in patients with this pathology.

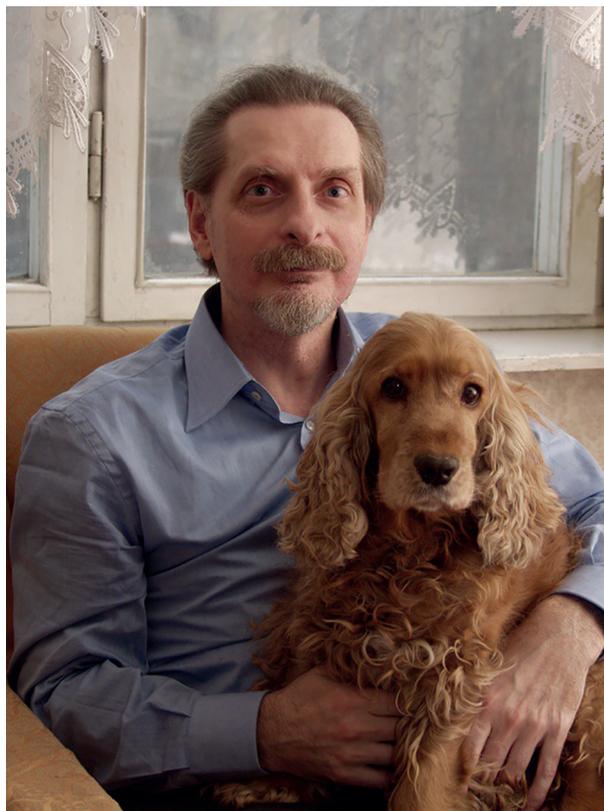
*Key words:* cochlear implantation, inner ear malformations, common cavity, cochleostomy

### REFERENCES

- Kuzovkov V.E., Lilenko A.S., Sugarova S.B., Tanaschishina V.A., Kalyapin D.D., Luppov D.S. *Faktyrskaya riska stimulyatsii litsevoogo nerva u pol'zovatelyakh kokhlearnykh implantov: nash opyt* [Risk factors for facial nerve stimulation in cochlear implant users: our experience]. *Rossiiskaya otorinolaringologiya* [Russian Otorhinolaryngology]. 2022. T. 5 (120). P. 116–121 (in Russian).  
<https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-5-116-121>
- Aljazeera I.A., Khurayzi T., Al-Amro M., Alzhrani F., Alsanosi A. Evaluation of computed tomography parameters in patients with facial nerve stimulation post-cochlear implantation. *Eur Arch Otorhinolaryngology*. 2021. V. 278 (10). P. 3789–3794.  
<https://doi.org/10.1007/s00405-020-06486-7>
- Jackler R.K., A. De La Cruz. The large vestibular aqueduct syndrome. *Laryngoscope*. 1989. V. 99 (10). P. 1238–1243.
- Jackler R.K., Luxford W.M., House W.F. Congenital malformations of the inner ear: a classification based on embryogenesis. *Laryngoscope*. 1987. V. 97 (1). P. 1–14.
- Morsli H., Tuorto F., Choo D. et al. Otx1 and Otx2 activities are required for the normal development of the mouse inner ear. *Development*. 1999. P. 2335–2343.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10225993/>
- Papsin B.C. Cochlear implantation in children with anomalous cochleovestibular anatomy. *Laryngoscope*. 2005. V. 115 (1 Pt. 2 Suppl 106). P. 1–26.  
<https://doi.org/10.1097/00005537-200501001-00001>
- Park A., Kou B., Hotaling A. et al. Clinical course of pediatric congenital inner ear malformations. *Laryngoscope*. 2000. P. 1715–1719.
- Rah Y.C., Yoon Y.S., Chang M.Y., Lee J.Y., Suh M.W., Lee J.H. et al. Facial nerve stimulation in the narrow bony cochlear nerve canal after cochlear implantation. *Laryngoscope*. 2016. V. 126 (6). P. 1433–1439.  
<https://doi.org/10.1002/lary.25655>
- Sennaroglu L., Saatci I. A new classification for cochleovestibular malformations. *Laryngoscope*. 2002. V. 112 (12). P. 2230–2241.
- Tucci D., Telian S., Zimmerman-Philips S. Cochlear implantation in patients with cochlear malformations. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 1995. P. 833–838.

## ПЕТР ПЕТРОВИЧ НИКОЛАЕВ

DOI: 10.31857/S0235009223040030, EDN: JSRMQA



09 сентября 2023 г. исполнилось 80 лет замечательному ученому, постоянному автору и члену редакционной коллегии нашего журнала доктору физико-математических и кандидату биологических наук Петру Петровичу Николаеву, главному научному сотруднику Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН. Вся его научная деятельность связана с этим институтом, где он начал свою работу в качестве стажера-исследователя после окончания физического факультета МГУ в 1966 г. Попав в лабораторию Н.Д. Ньюберга – крупнейшего на тот момент в СССР ученого в области цветовосприятия, Петр Петрович увлекся проблемами цветовой константности, которыми продолжает заниматься до настоящего времени. Первые научные работы Петр Петрович выполнял под руководством еще одного выдающегося ученого – М.М. Бонгарда, внесшего большой вклад в развитие направления распознавания образов, что также отразилось на научных предпочтениях Петра Петровича. В сферу его ин-

тересов вошли глобальные проблемы создания искусственного интеллекта и методов анализа изображений. Со временем основная область его исследований расширилась на системы технического зрения и проблемы константности восприятия формы объектов.

Предложенный Петром Петровичем физический подход к построению моделей цветовой сегментации и константного цветовосприятия получил международное признание. В 1990 г. Майкл Брилл – всемирно известный специалист в теории цвета – опубликовал научную работу, посвященную последовательному изложению физической теории, разработанной юбиляром. Петр Петрович еще в 80-е годы был одним из немногих тогда исследователей нелинейных спектральных цветковых моделей, и его теоретические результаты не пропали даром. На основе его цветковых и спектральных моделей молодыми последователями были созданы алгоритмы, внедренные в виде программного обеспечения в системы технического зрения различного назначения. Эти разработки использовались и используются такими международными корпорациями, как Самсунг и Хуавей, а также отечественной компанией-лидером в области распознавания документов Смарт Энджинс.

Среди публикаций Петра Петровича в последнее время выделяется большой цикл работ по методам проективно-инвариантного распознавания гладких фигур. Эти работы, изначально довольно далекие от практики и стимулируемые скорее внутренней красотой появляющейся математической теории, сейчас стали актуальными с точки зрения инженеров и прикладных исследователей, и в соответствующих журналах стали появляться работы о распознавании изображений на развертывающихся поверхностях, снятых в условиях перспективы.

Наряду с основными теоретическими работами по константности цветовосприятия и проективно-инвариантному распознаванию гладких фигур, Петр Петрович проводил и другие исследования в области интеллектуальных процессов и их моделирования, а также оригинальные эксперименты для оценки роли различных факторов в обеспечении инвариантности. Кроме того, он не мог не поддаться увлечению проблемами восприятия изображений, стабилизированных на сет-

чатке, которые активно обсуждались в лаборатории в середине прошлого века, в том числе и его учителем М.М. Бонгардом. Интригующие феномены, описанные сотрудником лаборатории А.Л. Ярбусом, использовавшим для создания стабилизированных изображений миниатюрные присоски, укрепляемые на глазу, стимулировали коллег развивать работы по стабилизации для получения количественных результатов и моделирования формирующихся в разных условиях видимых образов. Хотя монография А.Л. Ярбуса была переведена на английский язык и стала широко признанной, многие вопросы восприятия стабилизированных на сетчатке изображений оставались нерешенными из-за сложности постановки опытов и их кратковременности в связи с быстрым изменением давления внутри присоски, что мешало получить необходимое для анализа количество экспериментальных данных. Будучи по натуре рекордсменом и даже каскадером, П.П. Николаев азартно включился в работу по совершенствованию метода присосок, неутомимо выступая в качестве разработчика, создателя и испытателя каждой новой модификации присоски и парадигмы эксперимента. В результате потенциальная продолжительность опытов была увеличена от нескольких минут до получаса, степень фиксации присоски на глазу четко контролировалась, и были созданы условия для перехода от монокулярных экспериментов к бинокулярным. Благодаря этому были получены принципиально новые данные, заставляющие по-иному взглянуть на феномены, наблюдаемые при стабилизации изображений разного типа, и признать ключевую роль интерпретационных механизмов при формировании видимых образов. В последние годы П.П. Николаев внес важный вклад в выполнение проектов по исследованию периферического цветового зрения с использованием

контактных линз с имплантированными окклюдорами, исключаящими из восприятия центральную область сетчатки.

Петр Петрович всегда охотно передавал и передает свой опыт молодежи. Он выступал с приглашенными лекциями в МГУ на психологическом и механико-математическом факультетах, разработал авторский курс лекций “Модели и методы технического зрения” и вот уже пятнадцать лет читает его студентам МФТИ. Под его научным руководством защищаются дипломы и диссертации.

Коллеги и друзья ценят Петра Петровича не только как талантливого исследователя, но и как человека, наделенного неординарным поэтическим даром и художественными способностями. Сейчас выходит книга его стихов, написанных по поводу различных институтских событий и юбилейных дат, а в октябре в библиотеке ИППИ РАН прошла выставка его фрактальной живописи. Это живопись в необычном жанре изобразительного искусства – жанре, в котором абстракция формулы воплощается в зримых цвете и форме. Работы Петра Петровича далеко отходят от орнаментального подхода, свойственного фрактальной графике. Одной из своих целей автор видит передачу ощущения света, цвета и пространства, оставаясь за пределами предметности. И цели своей он достигает. Его работы неоднократно публиковались и представлялись на выставках. В Политехническом музее г. Москвы произведения юбиляра экспонировались в постоянной экспозиции.

Редакционная коллегия журнала “Сенсорные системы” поздравляют Петра Петровича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, дальнейших творческих удач во всех направлениях его интересов.