СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ, 2023, том 37, № 4, с. 320–329

ОБЗОРЫ

УДК 616.28-072:616.283.1-089.843

СЛУХОВОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРИ КОХЛЕАРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

© 2023 г. В. И. Пудов[1,*], О. В. Зонтова[1]

[1] ФГБУ Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи МЗ РФ
190013 Санкт-Петербург, ул. Броницкая, 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

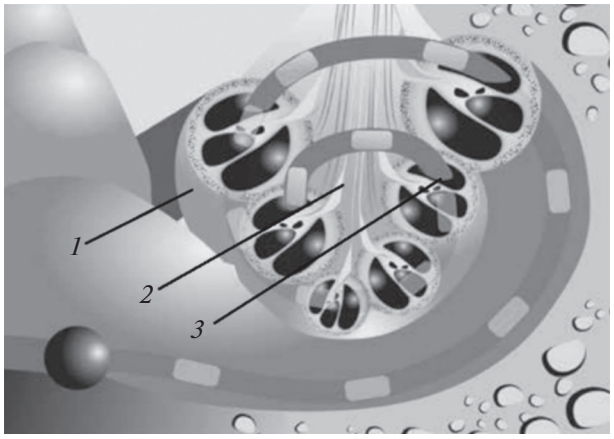

Рис. 1. Расположение электрода в улитке человека. *1* – улитка внутреннего уха; *2* – слуховой нерв; *3* – электродная решетка.

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

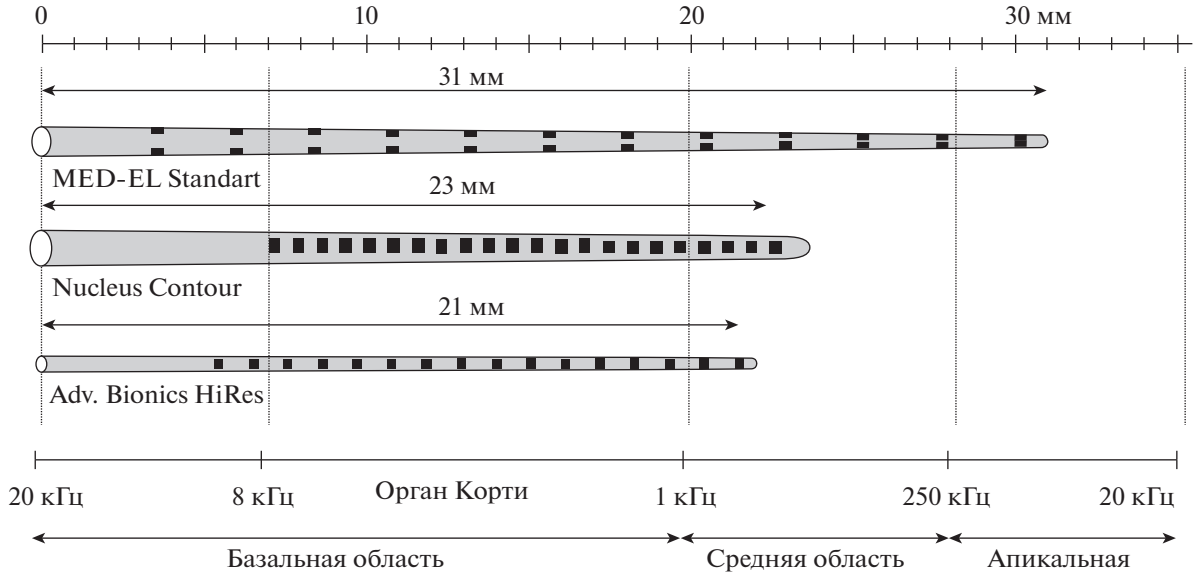

Рис. 2. Расположение электродов (Med-El Standard, Nucleus Contour, Advanced Bionics HiRes) на частотной оси вдоль развернутой улитки.

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 (Canfarotta, 2022). Более глубокое введение электродов улучшало распознавание речи вплоть до угла введения 600°, 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 (Canfarotta, 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 различение 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 полутон (Пудов, Стефанович, 2010; Стефанович, Пудов 2013). Различия в два полутона пациенты могли определить даже при раздражении через один электрод. Заметим, что один полутон 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 продемонстрировали 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 нелингвистический 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 2×10^{-5} Н/м^2) до очень большой (звуковое давление 20 Н/м^2) интенсивности, что соответствует динамическому диапазону 120 дБ. Динамический диапазон по интенсивности определяет число градаций различений 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 (Meredith 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 различения 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 способностью 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, Derinsu, 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, Dorman, 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 составлять 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., Lazzerini 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. Pediat. 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., Eddington 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[a,#] and O. V. Zontova[a]

[a] *Saint-Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech Russian Federation 190013 St. Petersburg, st. Broonitskaya, 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. *Muzikalinay 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 sensonevralinoi 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. at 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., Lazzerini 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 sluchorechevay 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. *Vospriytie muziki polizovatelymi kochlearnuch implantov* [Perception of music by cochlear implant users]. *Rossiiskay otorinolaringologiy* [Russian Otorhinolaryngology]. 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.

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. *Osobennosty 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-Rino-Laringologii]. 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., Eddington 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.