

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^{1,*}, Е. С. Гарбарук^{1,2}, М. Ю. Бобошко¹

¹ 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

² ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет”
Минздрава России

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

*E-mail: irina@savenko.ru

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;

– монауральные 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 обоих 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; Бобошко, Риехайнен, 2019).

– 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 двусложных 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 двусложных 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 (≤ 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-

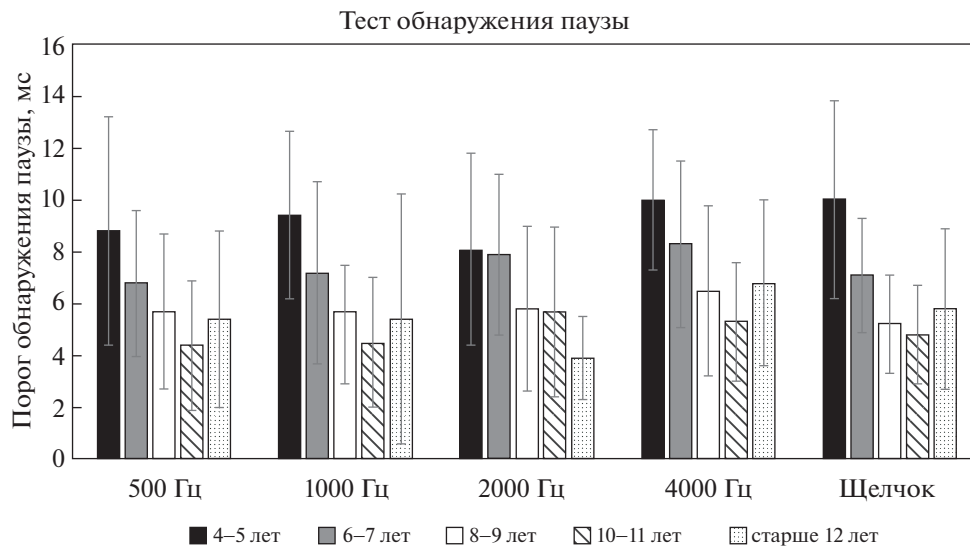


Рис. 1. Результаты оценки временной разрешающей способности посредством теста обнаружения паузы для разных возрастных групп детей.

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

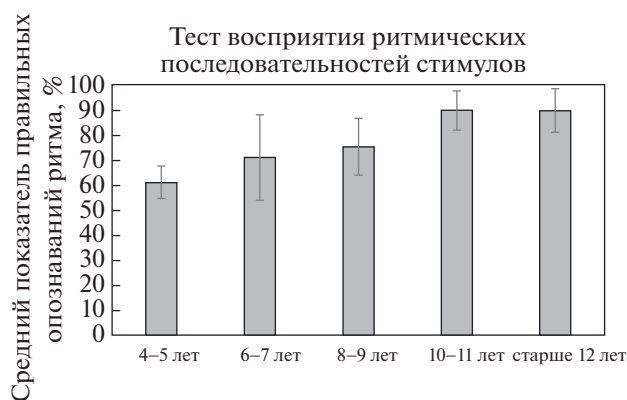


Рис. 2. Результаты оценки эффективности обработки временной последовательности посредством теста восприятия ритмических последовательностей стимулов.

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

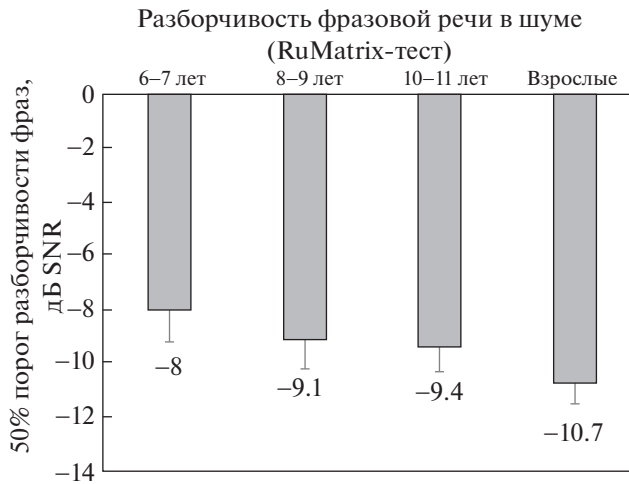


Рис. 3. Результаты разборчивости фразовой речи на фоне шумовой помехи для разных возрастных групп детей (данные по взрослым испытуемым (Гарбарук и др., 2020)).

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 ≤ 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-

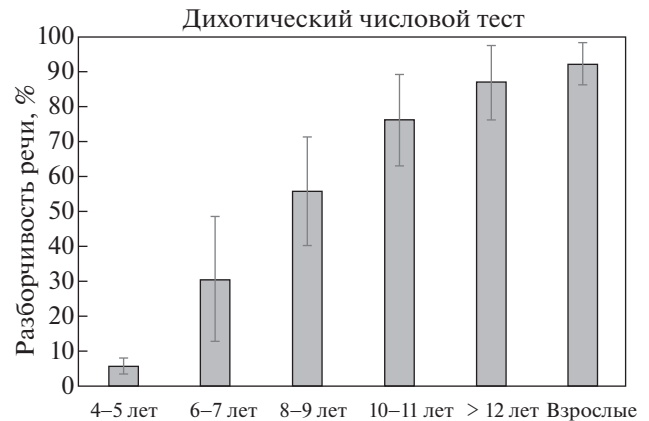


Рис. 4. Результаты дихотического числового теста для разных возрастных групп детей (данные по взрослым испытуемым (Бобошко и др., 2016)).

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 различение 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 RGDT, 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, Beaulieu, 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 средневолновых 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 выше лежащих 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 формировании 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, стволовые 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, стволовые 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 высших 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 разнотелесных слов для тестирования детей различного возраста (Бобошко, Риехаккайнен, 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., Тотолян 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., Риехаккайнен 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 мозолистого тела*. 2-е изд. (эл.). М.: Генезис, 2016. 176 с.
- Куку 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., 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
- 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., Gaggli 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 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. 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
- Scafoli 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)
- 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., Szkielewska 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^{a, #}, E. S. Garbaruk^{a, b}, and M. Yu. Boboshko^a

^a Pavlov First St. Petersburg State Medical University
197022 St. Petersburg, L. Tolstogo st., 6–8, Russia

^b St. Petersburg State Pediatric Medical University
194100 St. Petersburg, Lithuanian st., 2, Russia

[#]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., Kibalo-va 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 SPb-GMU [SPb: SPbSMU Press], 2012. 64 p. (in Russian).
- Boboshko M.Yu., Salakhbekov M.A., Zhilinskaia E.V., Maltseva N.V., Savenko I.V., Totoljan N.A. *Audiologicheskaya ocenka sostoyaniy centralnykh otделov 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. *Funktsionalnaya 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 russkoyzuchnoi 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 mozolistogo 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'nuy ontogenez sluchovoi sestemy i ee disfunktsii u detei, rodivshichsya nedonoschennumi* [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
- 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., Gaggli 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 Neuro-otology). 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>