

А.В. Пашков^{1, 2}, И.В. Наумова¹, И.В. Зеленкова¹, Л.С. Намазова-Баранова^{1, 3, 4}, Е.А. Вишнёва^{1, 3}, К.И. Воеводина²

¹ Научно-исследовательский институт педиатрии и охраны здоровья детей ЦКБ РАН, Москва, Российская Федерация

² Центральная государственная медицинская академия Управления делами Президента РФ, Москва, Российская Федерация

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Российская Федерация

⁴ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Российская Федерация

Автоматическая аудиометрия как скрининговое исследование слуховой функции у школьников: обзор литературы и собственный опыт

Контактная информация:

Пашков Александр Владимирович, доктор медицинских наук, руководитель отдела оториноларингологии и сурдологии НИИ педиатрии и охраны здоровья детей ЦКБ РАН, профессор кафедры оториноларингологии ЦГМА

Адрес: 119333, Москва, ул. Фотиевой, д. 10, стр. 1, e-mail: avpashkov@yandex.ru

Статья поступила: 19.04.2021, принята к печати: 22.06.2021

245

В условиях цифровизации здравоохранения автоматизация некоторых медицинских процессов становится крайне востребованной, особенно в ситуациях, когда нет возможности оперативно получить поддержку — например вследствие длительного времени ожидания (очередь) или отсутствия профильного специалиста. Такой подход поможет эффективно использовать ресурсы системы здравоохранения. Автоматическая аудиометрия — это пример автоматизированной диагностической услуги, в основе которой лежат алгоритмы и технические средства для регистрации порогов звуковосприятия с целью определения состояния слуховой функции. В обзоре подробно рассмотрены процесс создания технологии автоматизированного исследования слуха и отдельные компоненты системы (программное обеспечение, оборудование, источники акустической стимуляции). Авторами представлен собственный опыт применения аппаратного комплекса автоматической аудиометрии, приведены результаты сравнительного исследования автоматизированного и клинического тестов.

Ключевые слова: дети, автоматизированная аудиометрия, скрининг, тугоухость

Для цитирования: Пашков А.В., Наумова И.В., Зеленкова И.В., Намазова-Баранова Л.С., Вишнёва Е.А., Воеводина К.И. Автоматическая аудиометрия как скрининговое исследование слуховой функции у школьников: обзор литературы и собственный опыт. *Вопросы современной педиатрии*. 2021;20(3):245–250. doi: 10.15690/vsp.v20i3/2277

Aleksandr V. Pashkov^{1, 2}, Irina V. Naumova¹, Irina V. Zelenkova¹, Leila S. Namazova-Baranova^{1, 3, 4}, Elena A. Vishneva^{1, 3}, Ksenia I. Voevodina²

¹ Research Institute of Pediatrics and Children's Health in «Central Clinical Hospital of the Russian Academy of Sciences», Moscow, Russian Federation

² Central State Medical Academy of Department of Presidential Affairs of Russian Federation, Moscow, Russian Federation

³ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation

⁴ Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation

Automated Audiometry as the Screening of Hearing in Schoolchildren: Literature Review and Own Experience

In the era of healthcare digitalization, automation of some medical processes becomes extremely crucial, especially in situations where it is not possible to receive support quickly enough, for example, due to long wait for a specialist (queues) or absence of the needed specialist. This approach will help to use healthcare resources effectively. Automated audiometry is an example of automated diagnostic procedure based on algorithms and technical means for recording acoustic threshold in order to determine the hearing conditions. This review describes the process of automated hearing testing technology development in detail and several other system components (software, equipment, acoustic stimulation sources). The authors describe their own experience of using the automatic audiometry system. The results of comparative study of automated and clinical tests are presented.

Key words: children, automated audiometry, screening, hearing loss

For citation: Pashkov Aleksandr V., Naumova Irina V., Zelenkova Irina V., Namazova-Baranova Leila S., Vishneva Elena A., Voevodina Ksenia I. Automated Audiometry as the Screening of Hearing in Schoolchildren: Literature Review and Own Experience. *Voprosy sovremennoi pediatrii — Current Pediatrics*. 2021;20(3):245–250. doi: 10.15690/vsp.v20i3/2277

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированная аудиометрия является потенциально востребованным решением в условиях дигитализации и высоких потребностей в телемедицинских технологиях, в том числе при отсутствии врача-сурдолога или недоступности специализированного сурдологического подразделения.

Впервые технология автоматизированной аудиометрии была реализована в аудиометре Бекеши (Bekesy) в конце 1940-х гг. [1]. Этот прибор использовали в многочисленных исследованиях, в частности для изучения влияния окружающего шума на состояние слуха [2]. Автоматизированная аудиометрия обеспечивает доступность медицинской помощи, экономию временных и финансовых затрат, а также позволяет замещать отсутствующего специалиста [3, 4]. Данное исследование обычно используют для выполнения поведенческих тестов, наиболее распространенным из которых является тональная пороговая аудиометрия [5]. В традиционном варианте этот тест состоит из определения порогов воздушной и костной проводимости (оцениваются в децибелах — дБ) посредством стимулов, подаваемых соответственно через головные телефоны (наушники) и костный вибратор. Соотношение пороговых уровней воздушной и костной проводимости позволяет определить тип тугоухости — кондуктивную, сенсоневральную или смешанную [6]. Возможности автоматизированной аудиометрии зависят от диагностической точности и надежности используемой системы [4].

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АУДИОМЕТРИИ

В ряде исследований, посвященных автоматизации аудиометрии, описаны результаты применения теста AMTAS (automated method for testing auditory sensitivity) — метода исследования слуховой чувствительности для автоматической записи аудиограмм с чистым тоном, включая пороги воздушной и костной проводимости. В этом тесте пациент использует кнопки «да» и «нет» на сенсорном экране, чтобы указать, слышит он или не слышит звуковой сигнал. Тренд интенсивности сигнала (увеличение или уменьшение) различается в зависимости от ответа пациента, в результате чего алгоритм выстраивает тональную пороговую аудиограмму. При генерации сигнала с целью исключения непроизвольного «переслушивания» лучше слышащим ухом осуществляется звуковая маскировка на ухо, которое не тестируется. Амбюшюры (наушники) используются в этом тесте для снижения уровня окружающего шума. Это позволяет провести тест в тихой комнате вместо звукоизолированной (анэхоидной) кабины [2]. В исследовании R.H. Margolis и соавт. [7] обследование 30 участников (5 человек с нормальным слухом и 25 человек с нарушением слуха; возраст участников авторами не указан) с применением методики AMTAS показало следующее. Для порогов воздушной проводимости результаты тональной аудиометрии («вручную») и теста AMTAS были сходными либо отличались незначительно. Однако для порогов костной проводимости результаты тестирования различались значительно. Причинами этого могли быть неодинаковые уровни прижимной силы или места фиксации костного телефона, установившегося пациентами самостоятельно, что снижает перспективу использования данного модуля тональной аудиометрии для внедрения в алгоритмы автоматизации. В исследовании R.H. Eikelboom и соавт. [2] тест AMTAS в условиях тихой комнаты провели у 44 участников с различными степенями снижения слуха

(возраст авторами не указан). Результаты показали, что разброс значений аудиограммы для воздушной проводимости составил 0,5 дБ, для порогов костной проводимости — 4,5 дБ (как для автоматизированного, так и для «ручного» методов). Хотя пороги теста AMTAS были выше по сравнению с «ручным» методом, о значительной разнице значений порогов звуковосприятия не сообщалось.

Еще одной программой для автоматизации аудиометрии, разработанной для регистрации порогов воздушного звуковосприятия в домашних условиях, является ННТ (Home Hearing Test, домашний тест слуха). Сравнение результатов тестов, проведенных пациентами (лица в возрасте от 44 до 88 лет) самостоятельно в домашних условиях, с данными аудиометрии в клинике показало, что разница между ННТ и базовым клиническим тестом аудиометрии была несколько выше, чем между клиническим тестом аудиометрии и тестом AMTAS, и варьировала в 71% случаев от –5 до +5 дБ [8]. Причинами этих расхождений могли быть более продолжительный временной интервал между проведением теста ННТ и тональной аудиометрии в клинике (до 53 сут), а также окружающий шум домашней обстановки при проведении ННТ [8].

Кроме того, для проведения автоматической аудиометрии предложен онлайн-тест. Изучение этого теста (51 участник исследования в возрасте от 11 до 60 лет, средний возраст — 34 года) показало возможность использования онлайн-платформ для проведения скрининговых исследований слуха [9], а также для оценки уровней слуха [10]. Архитектура последнего теста предполагала интеграцию стандартизированной аудиологической базы данных пациента с его электронными медицинскими файлами. С точки зрения клинической эффективности данный метод показал, что его действенность не уступает традиционному методу аудиометрии для всех тестируемых частот. Более того, программные требования системы (трафик данных между сервером, аудиометром и терминалом аудиолога) были невысокими, что позволяет широко внедрить данную технологию [10].

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АУДИОМЕТРИИ

В ряде исследований предлагали аппаратные решения для автоматизированной аудиометрии. Одной из таких разработок является портативный аудиометр KUDUwave [11–13], укомплектованный головными телефонами (наушниками) с амбюшюрами, предназначенными для устранения шума окружающей среды [14]. Данная система обеспечивает возможность проверки слуха при уровне шума окружающей среды (уровень звукового давления) до 59 дБ. Более того, в системе предусмотрена техническая возможность мониторинга уровня окружающего шума, при превышении порогового значения которого тестирование автоматически прекращается. Таким образом, портативная аудиометрия может быть выполнена вне звукоизолированного помещения [13]. В KUDUwave предусмотрена возможность маскировки звука, когда это необходимо: если разница между порогами воздушной проводимости на правое и левое ухо составляет 75 дБ на частоте ≤ 1000 Гц или если разница ≥ 50 дБ для частот > 1000 Гц, уровень маскировки автоматически устанавливается в 30 дБ для лучше слышащего (неисследуемого) уха. При исследовании костного проведения уровень маскировки составлял 20 дБ [11, 12].

В исследовании, проведенном W. Swanepoel и L. Biagio [11], эффективность KUDUwave оценивали у 30 человек в возрасте от 19 до 77 лет. Результаты показали, что пороги воздушной проводимости имели разницу около

5 дБ со значениями, зафиксированными традиционным методом, у 90% участников. Пороги костной проводимости имели различия до 10 дБ по сравнению со значениями, зарегистрированными методом традиционной аудиометрии, у 92% участников. При повторном проведении теста результаты исследования незначительно отличались от предыдущих: разброс порогов составил до 15 дБ в 91% наблюдений. При этом для традиционной аудиометрии у этих же пациентов различия в результатах составили до 10 дБ (92% наблюдений). Более выраженные различия в результатах могут быть связаны с вариантами установки костного вибратора [11].

В другом исследовании [12] оценивали состояние слуха у пациентов в возрасте от 7 до 95 лет (средний возраст — 57 лет) с применением KUDUwave и традиционной аудиометрии. Традиционный тест аудиометрии проводили в звукоизолированном помещении, а автоматизированный тест — в помещении без звукоизоляции. Костный вибратор устанавливали на область сосцевидного отростка (аудиометрия) и лба (KUDUwave). Результаты исследования показали, что различия в порогах слуха были незначительны — 86,5% зарегистрированных значений находились в диапазоне до 10 дБ. Хотя полученные на разных частотах данные являлись статистически значимыми, авторы рекомендуют проведение дальнейших исследований для определения клинического использования автоматической диагностики [12].

Регистрировали пороги воздушного звуковосприятия у испытуемых (возраст авторами исследования не указан) с нормальным слухом (30 человек) и тугоухостью (8 человек). Полученные результаты сопоставляли с данными тональной пороговой аудиометрии. Результаты показали, что автоматизированная аудиометрия — это эффективный метод оценки слуха у взрослых людей как с нормальным слухом, так и с тугоухостью. Это позволяет рассматривать автоматизированную аудиометрию и как телемедицинскую технологию [13].

В исследовании, проведенном D.K. Meinke и соавт. [14], была использована мобильная беспроводная автоматизированная система проверки слуха WAHTS (wireless automated hearing-test system), разработанная с учетом возможности проведения исследования в незвукоизолированной среде. Эффективность системы оценивали у 20 участников в возрасте старше 18 лет в шести локациях, а результаты сравнивали с данными аудиометрии, полученными в условиях звукоизолированной кабины. В целом различия между порогами, зарегистрированными при помощи системы WAHTS и традиционной пороговой тональной аудиометрии, отличались не более чем на 5 дБ [14].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМАРТФОНОВ И ПЛАНШЕТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛУХА

В исследовании, проведенном J.P. Whifton и соавт. [5], изучались результаты применения с целью исследования слуха приложений для планшетов. Алгоритм тестирования слуховой функции был близок к подходам, используемым в традиционной тональной пороговой аудиометрии. Тестовые сигналы пациентам (все — взрослые) подавались с интервалом от 3 до 7 с при максимальном ожидании ответа испытуемого до 2,5 с. Тест проводили в домашних условиях и в клинике. Различия между средними значениями были незначительными. Отмечено увеличение пороговых результатов для низких частот (≤ 250 Гц) при тестировании в домашних условиях. Это могло быть связано с окружающим шумом, характерным для домашней обстановки. Исследование показало, что возможны наблюдения за нарушениями слуха и вне клиники.

В другом исследовании ($n = 94$, участники в возрасте 18–88 лет, средний возраст — 41 год) [3] изучали эффективность приложения для смартфона hearScreen, которое предназначено для регистрации порогов звуковосприятия. Критерием исключения в исследовании была односторонняя тугоухость с разницей порогов звуковосприятия более 40 дБ над порогом слуха (нПс) для исключения эффекта «переслушивания» лучше слышащим ухом. Пороги, превышающие 15 дБ нПс, коррелировали с порогами, зарегистрированными через приложение, в пределах ≤ 10 дБ в 80,6% случаев. Таким образом, было показано, что исследование воздушной проводимости может быть корректно выполнено при помощи приложения для смартфона как в звукоизолированном помещении, так и вне его (при отсутствии критических значений окружающего шума) [3].

Еще одно приложение, hearTest, было разработано для Android-смартфонов и предполагало использование головных телефонов (наушников) с амбушюрами. Результаты его использования (в исследовании участвовали 95 пациентов, из них 65 — подростки, средний возраст которых составлял 16,5 лет) показали отсутствие существенных различий по сравнению с традиционной тональной пороговой аудиометрией — за исключением частоты 4 кГц. Различия менее 5 дБ (в сравнении с традиционной аудиометрией) имели 70,6% результатов пороговых значений, определенных приложением. Кроме того, продолжительность тестов существенно не различалась при использовании их в аудиологических клиниках и «самостоятельно» (пациент не выбирает параметры звуковой стимуляции — он только реагирует на предложенную алгоритмом последовательность стимулов) [15].

Для платформы iOS было создано приложение iHear audiometer [16]. Корректность его работы также сравнивали с традиционной аудиометрией. Участниками исследования были 86 учеников начальной школы в возрасте от 8 до 10 лет. Различия результатов, полученных iHear и традиционным методом, заключались в том, что пороги скрининга iHear были выше на всех частотах. В этом тесте использовали некалиброванные штатные внутриканальные телефоны («внутриушные наушники») устройства (iPhone). Авторы предлагают дальнейшее изучение возможностей использования внутриканальных телефонов для исследований слуха с учетом окружающего шума за счет дополнительной калибровки и обеспечения полной obturation наружного слухового прохода, что особенно критично для школы.

Другое приложение на базе iOS, EarTrumpet, было разработано для регистрации порогов звуковосприятия в тихом помещении или условиях звукоизоляции. Маскировка активировалась автоматически, когда разница пороговых значений между ушами была ≥ 35 дБ. Звуковая маскировка представляла собой узкополосный шум с центральной тестируемой частотой. Результаты исследования приложения показали (дети в исследовании не участвовали), что в среднем 96% порогов, зарегистрированных автоматически в условиях звукоизоляции, имели различия в пределах до 10 дБ по сравнению с порогами, зарегистрированными методом традиционной аудиометрии. Полученные данные позволили авторам сделать вывод о возможности использования приложения для проведения автоматизированной аудиометрии без специализированного аудиометрического оборудования [17].

ИСТОЧНИКИ СТИМУЛА

Головные телефоны

Существуют два важных фактора, влияющих на выбор источника звука: подавление окружающего шума

и эффект окклюзии. Поскольку автоматизированное исследование слуха может проводиться вне звукоизолированного помещения, уровень окружающего шума необходимо свести к минимуму, что является залогом получения корректных результатов. Он должен быть намного ниже, чем уровень тестового сигнала, чтобы испытуемый мог выделить последний [14]. Окклюзия (закрытие наушником наружного слухового прохода) влияет на результаты регистрации порогов костной проводимости (особенно на низких частотах), искажая субъективные ощущения от восприятия вибрации, передаваемой через кости черепа [18], поэтому исследование костного проведения необходимо всегда осуществлять при открытом наружном слуховом проходе. Вместе с тем при регистрации костной проводимости в автоматическом режиме следует учитывать дополнительное влияние окружающего шума, в том числе при выполнении тестов с маскировкой [5].

Можно выделить три основных варианта головных телефонов: закрытого типа, открытого типа, внутриканальные. С точки зрения звукоизоляции от окружающего шума наиболее эффективными являются головные телефоны закрытого типа [7]. Отдельного внимания заслуживает технология установки в наушники встроенных микрофонов с возможностью автоматической остановки исследования при регистрации повышенных значений фонового шума [14].

Костный вибратор

Один из важных технических факторов в автоматизированной аудиометрии с оценкой порогов костного звукопроведения — это место фиксации костного вибратора. Описаны две области фиксации: сосцевидный отросток исследуемого уха и лобная кость. Сосцевидный отросток используют в традиционных тестах аудиометрии [7]. Лобная кость предпочтительнее для автоматизированного тестирования, поскольку в этом случае нет необходимости менять размещение костного вибратора во время теста [8]. Примером такого автоматизированного аудиометра можно считать описанный выше KUDUwave. Проведенные сравнительные исследования с традиционной аудиометрией показали, что для порогов костной проводимости различия в значениях выше по сравнению с результатами исследования воздушного проведения [12, 13]. Эти различия могут быть связаны с местом фиксации вибратора, его удаленностью от улитки. Вместе с тем отмечена устойчивая корреляция порогов костной проводимости для традиционного и автоматического тестов [8].

ОСОБЕННОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АУДИОМЕТРИИ

Программное обеспечение, используемое для автоматизированной аудиометрии, должно отвечать следующим требованиям:

- интуитивно понятный интерфейс для проведения исследования пациентом самостоятельно;
- сопоставимость тестируемых частот с параметрами клинического теста для обеспечения преимущественности диагностики в случае выявления нарушений слуха;
- возможность хранения результатов исследований в базе данных для оценки динамики изменений;
- надежность для проведения многократных исследований.

Место для установки диагностических комплексов необходимо выбирать с учетом окружающего фонового шума, минимизируя его влияние на получаемые резуль-

таты. В этой связи проведение автоматизированной аудиометрии вне условий сурдокамеры устанавливает дополнительные требования к головным телефонам. Наиболее эффективным техническим решением являются головные телефоны закрытого типа, которые могут обеспечить максимальную изоляцию от окружающего шума. Применение протокола регистрации порогов костного проведения требует дополнительного изучения, поскольку для выявления нарушений слуха исследования воздушной проводимости достаточно, а в случае обнаружения патологии дальнейшее обследование проводят в условиях специализированного подразделения сурдологии.

Внедрение технологии автоматизированной аудиометрии вне специализированных медицинских учреждений, например в рамках программы школьной медицины, будет способствовать раннему выявлению лиц с возможными нарушениями слуха, направлению их на диагностику с последующим лечением или реабилитацией, что, в свою очередь, минимизирует медицинские и социальные потери от развития тугоухости. Для этих же целей перспективной является разработка средств диагностики на основе приложений для смартфонов и планшетов, что, помимо прочего, еще и снижает затраты на приобретение оборудования. Однако необходимо осуществлять постоянную поддержку таких приложений и предусмотреть унификацию собираемых данных для обеспечения преемственности с клиническими тестами.

СОБСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АУДИОМЕТРИИ

Для оценки точности системы автоматической аудиометрии мы провели сравнение результатов автоматизированного и клинического (традиционного) тестов. Традиционный метод тональной пороговой аудиометрии был выбран нами в качестве «золотого стандарта». В исследование включали детей — учащихся средней общеобразовательной школы, не предъявлявших жалоб на нарушения слуха (снижение слуха и/или разборчивости речи), способных корректно выполнять инструкции процедуры тестирования, при наличии мотивации (желания пациента и родителей получить знания о состоянии слуха). От законных представителей всех участников, а также от участников в возрасте ≥ 15 лет получено подписанное информированное добровольное согласие на проведение исследования слуха.

Поведенческие пороги (пороги звуковосприятия) определяли в речевом диапазоне частот при помощи тональной пороговой аудиометрии с использованием клинического аудиометра AC40 Interacoustics (Interacoustics, Дания) в условиях анэхоидной камеры. Уровень фонового шума составлял < 60 дБ. Акустическую стимуляцию подавали в стандартном режиме с использованием головных телефонов TDH39AA с амбушюрами Amplivox (Amplivox, Великобритания) и костного телефона с оголовьем B81 (RadioEar, США). Автоматизированную аудиометрию проводили с помощью аппаратно-программного комплекса «Колибри» («Исток-Аудио Интернешнл», Россия). Комплекс включает двухполосную активную акустическую систему (диапазон воспроизводимых частот — от 43 до 24 000 Гц, максимальная выходная мощность — 82 Вт), звуковую карту с встроенной индукционной петлей, USB-радиоресивер (частота соединения — 2,4 МГц, радиус действия — 10 м) и беспроводную выносную кнопку. Акустическая стимуляция на частотах 500, 1000, 2000, 4000 Гц проводилась с применением головных телефонов на оголовье HD 205 (Sennheiser, Германия) (диапазон

воспроизводимых частот — от 14 до 20 000 Гц, уровень звукового давления — 112 дБ).

В первую очередь все участники проходили исследование слуха при помощи тональной пороговой аудиометрии с помощью аудиометра AC40 Interacoustics, далее пациента тестировали посредством аппаратно-программного комплекса «Колибри». При этом результаты первого исследования были доступны специалистам, проводившим второе исследование. Тугоухость устанавливали на основании результатов тональной пороговой аудиометрии («золотой стандарт») в соответствии с международной классификацией степеней тугоухости [19].

В исследовании приняли участие 112 школьников (224 уха) в возрасте от 7 до 17 лет (средний возраст — $12 \pm 3,5$ лет), среди них девочек — 48 (42,9%). Различные формы тугоухости были выявлены у 20 (17,9%) пациентов. Кондуктивная тугоухость обнаружена у 17 детей, из них двустороннее поражение слуха отмечено в 14 случаях, одностороннее — у 3 пациентов. Троем учащимся (5 ушей) установлен диагноз сенсоневральной тугоухости, из них двое имели двустороннее поражение звуковосприятия.

Сравнение результатов тональной пороговой аудиометрии и автоматизированного метода в группе нормально слышащих учащихся и у школьников с нарушением слуха представлено в табл. 1 и 2. Точность метода автоматической аудиометрии была вычислена как разность средних для анализируемых групп по каждой исследуемой частоте и представлена в виде условного поправочного коэффициента (который в дальнейшем, возможно, будет скорректирован по результатам дополнительных исследований).

В группе пациентов с тугоухостью точность метода автоматизированной аудиометрии была выше по сравнению с нормально слышащими школьниками. Распределение средних порогов значений у пациентов

с тугоухостью представлено в табл. 2. В группе нормально слышащих детей наивысший условный поправочный коэффициент получен на частоте 500 Гц — 31,3 дБ нПс (см. табл. 1). В этой группе на всех исследованных частотах (кроме 500 Гц) значение условного поправочного коэффициента было незначительным, что свидетельствовало о более высокой точности метода автоматической аудиометрии при выявлении патологии слуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования автоматической аудиометрии свидетельствуют о высокой точности метода у пациентов с патологией слуха, в том числе при отсутствии активных жалоб, что подтверждено для значений на частотах 1000, 2000, 4000 Гц в сравнении с показателями тональной пороговой аудиометрии. Проведенное исследование демонстрирует широкие перспективы применения автоматизированной аудиометрии как скринингового метода исследования слуха, который позволяет выявлять лиц с возможным отклонением от нормы. Вопросом, требующим дальнейшего обсуждения, является допустимость принятия порогов «нормы» для исследований, проводимых вне клиники, поскольку пороговые значения у нормально слышащих лиц превышали традиционное значение 20–25 дБ нПс. Кроме того, необходимо сформулировать критерии выбора помещения для проведения такого скрининга с точки зрения значений фонового шума. В целях совершенствования метода и уточнения значений условного поправочного коэффициента запланированы исследования влияния различных факторов, в том числе фонового шума.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Не указан.

FINANCING SOURCE

Not specified.

Таблица 1. Средние поведенческие пороги на частотах 500–4000 Гц у нормально слышащих детей: результаты тональной пороговой аудиометрии и автоматизированной аудиометрии

Table 1. Mean behavioral thresholds on 500–4000 hertz in healthy children: results of tonal threshold audiometry and automated audiometry

Метод	Поведенческие пороги, Гц			
	500	1000	2000	4000
Тональная пороговая аудиометрия, дБ нПс	10,4 ± 5,4	6,5 ± 4,6	10,1 ± 4,6	7,8 ± 11,3
Автоматизированная аудиометрия, дБ нПс	41,7 ± 10,1	24,1 ± 6,9	22,3 ± 6,8	25,6 ± 4,6
Условный поправочный коэффициент	31,3	17,6	12,2	17,7

Примечание. Описание количественных показателей выполнено с указанием среднего арифметического и стандартного отклонения.
Note. Description of quantitative indicators is performed with indication of arithmetic mean and standard deviation.

Таблица 2. Средние поведенческие пороги на частотах 500–4000 Гц у пациентов с тугоухостью: результаты тональной пороговой аудиометрии и автоматизированной аудиометрии

Table 2. Mean behavioral thresholds on 500–4000 hertz in patients with hearing loss: results of tonal threshold audiometry and automated audiometry

Метод	Поведенческие пороги, Гц			
	500	1000	2000	4000
Тональная пороговая аудиометрия, дБ нПс	27,2 ± 9,6	22,2 ± 12,4	19,8 ± 14,8	21,4 ± 15,2
Автоматизированная аудиометрия, дБ нПс	45,8 ± 14,3	34,7 ± 13,7	30,1 ± 3,52	28,8 ± 11,8
Условный поправочный коэффициент	27,9	12,1	8,4	9,8

Примечание. Описание количественных показателей выполнено с указанием среднего арифметического и стандартного отклонения.
Note. Description of quantitative indicators is performed with indication of arithmetic mean and standard deviation.

РАСКРЫТИЕ ИНТЕРЕСОВ

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

DISCLOSURE OF INTEREST

Not declared.

ORCID

А.В. Пашков

<https://orcid.org/0000-0002-3197-2879>

И.В. Наумова

<https://orcid.org/0000-0002-0559-4878>

И.В. Зеленкова

<https://orcid.org/0000-0001-6158-9064>

Л.С. Намазова-Баранова

<https://orcid.org/0000-0002-2209-7531>

Е.А. Вишнёва

<https://orcid.org/0000-0001-7398-0562>

К.И. Воеводина

<https://orcid.org/0000-0002-0249-1662>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Mahomed F, Swanepoel W, Eikelboom RH, Soer M. Validity of automated threshold audiometry: a systematic review and meta-analysis. *Ear Hear.* 2013;34(6):745–752. doi: 10.1097/01.aud.0000436255.53747.a4
2. Eikelboom RH, Swanepoel W, Motakef S, Upson GS. Clinical validation of the AMTAS automated audiometer. *Int J Audiol.* 2013;52(5):342–349. doi: 10.3109/14992027.2013.769065
3. Sandstrom J, Swanepoel W, Carel H, Laurent C. Smartphone threshold audiometry in underserved primary health-care contexts. *Int J Audiol.* 2016;55(4):232–238. doi: 10.3109/14992027.2015.1124294
4. Margolis RH, Morgan DE. Automated pure-tone audiometry: an analysis of capacity, need, and benefit. *Am J Audiol.* 2008;17(2):109–113. doi: 10.1044/1059-0889(2008/07-0047)
5. Whitton JP, Hancock KE, Shannon JM, Polley DB. Validation of a self-administered audiometry application: an equivalence study. *Laryngoscope.* 2016;126(10):2382–2388. doi: 10.1002/lary.25988
6. Грычыньскі М., Хоффманн Б., Яськевич М. и др. *Руководство по аудиологии и слухопротезированию* / под ред. Я.Б. Лятковского; пер. с польск. под ред. Н.А. Дайхеса. — М.; 2009. — 240 с. [Grychyn'skii M, Khoffmann B, Yas'kevich M, et al. *Rukovodstvo po audiologii i slukhoprotezirovaniyu*. Lyatkovskii YaB, ed.; translation from Polish Daikhes NA, ed. Moscow; 2009. 240 p. (In Russ).]
7. Margolis RH, Glasberg BR, Creeke S, Moore BC. AMTAS: automated method for testing auditory sensitivity: validation studies. *Int J Audiol.* 2010;49(3):185–194. doi: 10.3109/14992020903092608
8. Margolis RH, Killion MC, Bratt GW, Saly GL. Validation of the Home Hearing Test. *J Am Acad Audiol.* 2016;27(5):416–420. doi: 10.3766/jaaa.15102
9. Masalski M, Krecicki T. Self-test web-based pure-tone audiometry: validity evaluation and measurement error analysis. *J Med Internet Res.* 2013;15(4): e71. doi: 10.2196/jmir.2222
10. Yao J, Wan Y, Givens GD. Using web services to realize remote hearing assessment. *J Clin Monit Comput.* 2010;24(1):41–50. doi: 10.1007/s10877-009-9208-6
11. Swanepoel W, Biagio L. Validity of diagnostic computer-based air and forehead bone conduction audiometry. *J Occup Environ Hyg.* 2011;8(4):210–214. doi: 10.1080/15459624.2011.559417
12. Brennan-Jones CG, Eikelboom RH, Swanepoel W, et al. Clinical validation of automated audiometry with continuous noise-monitoring in a clinically heterogeneous population outside a soundtreated environment. *Int J Audiol.* 2016;55(9):507–513. doi: 10.1080/14992027.2016.1178858
13. Swanepoel W, Mngemane S, Molemong S, et al. Hearing assessment-reliability, accuracy, and efficiency of automated audiometry. *Telemed J E Health.* 2010;16(5): 557–563. doi: 10.1089/tmj.2009.0143
14. Meinke DK, Norris JA, Flynn BP, Clavier OH. Going wireless and booth-less for hearing testing in industry. *Int J Audiol.* 2017;56(sup1):41–51. doi: 10.1080/14992027.2016.1261189
15. van Tonder J, Swanepoel W, Mahomed-Asmail F, et al. Automated smartphone threshold audiometry: validity and time efficiency. *J Am Acad Audiol.* 2017;28(3):200–208. doi: 10.3766/jaaa.16002
16. Khoza-Shangase K, Kassner L. Automated screening audiometry in the digital age: exploring uHear and its use in a resource-stricken developing country. *Int J Technol Assess Health Care.* 2013;29(1):42–47. doi: 10.1017/S0266462312000761
17. Foulad A, Bui P, Djalilian H. Automated audiometry using apple iOS-based application technology. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2013;149(5):700–706. doi: 10.1177/0194599813501461.
18. Voss SE, Herrmann BS. How does the sound pressure generated by circumaural, supra-aural, and insert earphones differ for adult and infant ears? *Ear Hear.* 2005;26(6):636–650. doi: 10.1097/01.aud.0000189717.83661.57
19. Olusanya BO, Davis AC, Hoffman HJ. Hearing loss grades and the *International classification of functioning, disability and health*. *Bull World Health Organ.* 2019;97(10):725–728. doi: 10.2471/BLT.19.230367