

Zastosowanie kliniczne pomiarów tympanometrii szerokopasmowej u dzieci

Clinical applications of wideband tympanometry in children

MICHAŁ KOTOWSKI, BEATA PUCHER, BARTOSZ POLSKI, JAGODA KOLASIŃSKA-LIPIŃSKA, JAKUB SROCZYŃSKI, JAROSŁAW SZYDŁOWSKI

Klinika Otolaryngologii Dziecięcej, Szpital Kliniczny im. Karola Jonschera Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

Wprowadzenie. Tympanometria szerokopasmowa (wideband tympanometry, WBT) jest narzędziem diagnostycznym wchodzącym w skład audiometrii impedancyjnej, umożliwiającym pomiary absorpcji ucha środkowego w funkcji częstotliwości 226 Hz – 8 kHz. Daje ona możliwość oceny tympanogramów dla poszczególnych częstotliwości bodźca, uśrednionych oraz tympanogramów częstotliwości rezonancyjnej. Dotychczasowe badania wskazują, że metoda ta może mieć szczególne zastosowanie w skryningu noworodkowym oraz diagnostyce takich patologii jak: obecność płynu w jamie bębenkowej, otoskleroza, przerwanie ciągłości łańcucha kosteczek, nadmierne wiotka błona bębenkowa, dehiscencje na kanale półkolistym.

Cel pracy. Próba oceny przydatności klinicznej WBT w diagnostyce i monitorowaniu pooperacyjnym pacjentów z wysiękowym zapaleniem ucha środkowego.

Materiał i metody. Grupę badaną stanowiło 12 dzieci z niedosłuchem o charakterze przewodzeniowym i śródoperacyjnie potwierdzonym wysiękowym zapaleniem ucha środkowego. Ocena audiologiczna obejmowała: rejestrację produktów zniekształceń nieliniowych ślimaka, audiometrię impedancyjną (IA-226 Hz), audiometrię tonalną progową – w wybranych przypadkach oraz WBT. Przeprowadzono ją dwukrotnie: przedoperacyjnie oraz w okresie pooperacyjnym, 4 tygodnie po zabiegu. Dokonano analizy otrzymanych wyników pod kątem przydatności klinicznej stosowania pomiarów WBT u dzieci.

Wyniki. Wartości absorpcji rejestrowane w okresie przedoperacyjnym były niższe od wartości normatywnych. Pooperacyjny pomiar absorpcji wskazywał w 20 uszach na uniesienie krzywych w zakresie < 2 kHz. W 2 przypadkach zapis nie uległ istotnej poprawie, w kolejnych 2 był niewiarygodny.

Wnioski. Metoda tympanometrii szerokopasmowej wydaje się być obiecującą alternatywą dla klasycznych pomiarów audiometrii impedancyjnej u dzieci. Ze względu na możliwość dokonywania pomiarów absorpcji bez zmian ciśnienia znajduje ona zastosowanie w monitorowaniu efektów leczenia bezpośrednio w okresie pooperacyjnym.

Słowa kluczowe: tympanometria szerokopasmowa, absorpcja, przewlekłe wysiękowe zapalenie ucha środkowego

Introduction. Wideband tympanometry (WBT) is an impedance audiometry diagnostic tool using wide range of frequencies from 226Hz to 8kHz, with an option to assess middle ear absorbance vs. frequency as well as present different tympanograms: averaged wideband and resonance frequency types. The research carried out up to now suggests that this method may be successfully used for screening of newborns and diagnosing of the following pathologies: fluid in the middle ear, otosclerosis, ossicular chain discontinuity, flaccid eardrum, dehiscences of the semicircular canals.

Aim. The aim of the study was to assess the clinical usefulness of WBT in the diagnostics and post-surgical follow-up of patients with chronic otitis media with effusion (COME).

Material and methods. The study group consisted of 12 children with conductive hearing loss and COME confirmed intraoperatively. Audiological assessment comprised distortion product otoacoustic emission, impedance audiometry (226Hz), pure-tone audiometry (in selected cases) and WBT. All these tests were performed twice: preoperatively and four weeks after surgery. The results were analysed with reference to the clinical usefulness of performing WBT tests in children.

Results. The results of measured absorbance were lower in preoperative tests compared to normative data. Post surgical assessment revealed elevation of curves in the < 2kHz range in 20 ears. In two cases the absorbance did not improve, and in two other cases the results were not reliable.

Conclusions. WBT seems to be a promising alternative for conventional impedance audiometry in children. Regarding the possibility of performing of non-pressurized absorbance measurements, this method may be used for immediate post-surgical monitoring of the treatment effect.

Keywords: wideband tympanometry, wideband absorbance, chronic otitis media with effusion

Wstęp

Tympanometria jest od wielu lat szeroko stosowanym narzędziem diagnostycznym. Znajduje zastosowanie od lat 60. XX wieku i jest aktualnie standardową procedurą diagnostyczną w procesie oceny narządu słuchu [1].

Najważniejszą cechą klasycznej tympanometrii jest pomiar admitancji akustycznej przy zastosowaniu bodźca o charakterze czystego tonu o częstotliwości 226 Hz, a dane zawarte w klasycznych tympanogramach obejmują m.in. gradient, szczytowe ciśnienie tympanometryczne, podatność statyczną [2, 3].

Tympanometria szerokopasmowa (*wideband tympanometry*, WBT) jest nową metodą diagnostyczną i cechuje się wykorzystaniem bodźca o charakterze szerokopasmowego trzasku w zakresie częstotliwości od 226 Hz do 10 kHz u dorosłych i do 20 kHz u niemowląt ze względu na znaczące różnice wymiarów przewodów słuchowych zewnętrznych [4]. W praktyce klinicznej zakres częstotliwości bodźca ograniczono do przedziału 226 Hz – 8 kHz.

Dzięki tym pomiarom otrzymujemy zarówno tradycyjne tympanogramy, jak i szereg dodatkowych informacji zawartych w uśrednionym tympanogramie szerokopasmowym, tympanogramie 3D (ryc. 1), wykresie absorbancji oraz tympanogramie częstotliwości rezonansowej. Ogromnym atutem tej metody jest możliwość przeprowadzenia testu absorbancji bez zmian ciśnienia, który jest niezastąpiony w przypadku bezpośredniego monitorowania kooperacyjnego.

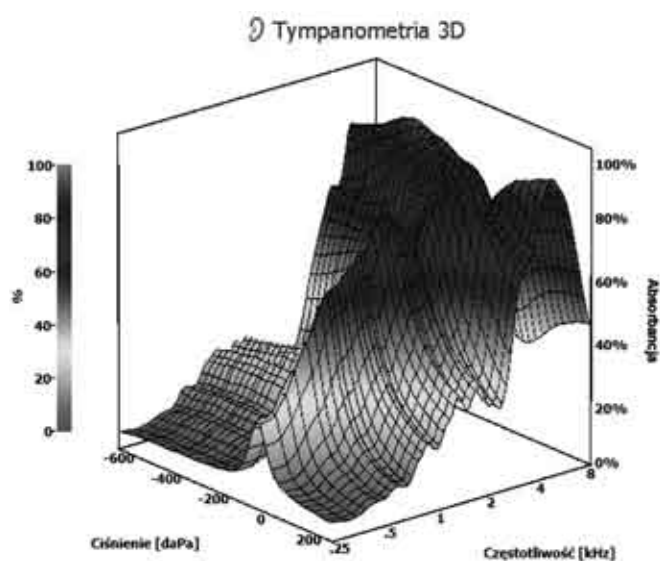
Uśredniony tympanogram szerokopasmowy jest graficzną prezentacją wielu dokonanych pomiarów tympanometrycznych w postaci uśrednionej

w określonym zakresie częstotliwości. Przedział częstotliwości dla stosowanego bodźca różni się w zależności od wieku dziecka i wynosi dla dzieci <6 m.ż. 800-2000 Hz, dla dzieci >6 m.ż. 375-2000 Hz. Szeroki zakres częstotliwości pomiaru czyni go bardziej niezależnym od zakłóceń zewnętrznych (np. hałas związany z ruchami osoby badanej). Dotychczasowe badania wskazują, że zastosowanie uśrednionych tympanogramów szerokopasmowych ma istotnie wyższą wartość w ocenie stanu ucha środkowego u noworodków w porównaniu do oceny tympanogramów 1000 Hz, których prawidłowa rejestracja niejednokrotnie może być trudna [5].

Tympanogram częstotliwości rezonansowej. O częstotliwości rezonansowej ucha środkowego możemy mówić w przypadku zastosowania najniższej możliwej częstotliwości bodźca dla którego układ przewodzący jest z nim w jednakowej fazie i stymulacja odbywa się w warunkach ciśnienia panującego w jamie ucha środkowego. Odpowiada to częstotliwości przy której masa i sztywność układu ma jednakowy wpływ na wartości admitancji ucha środkowego. Kliniczne zastosowanie tympanogramu częstotliwości rezonansowej odnosi się do oceny nieprawidłowości łańcucha kosteczek słuchowych. Zwykle obserwujemy wyższe częstotliwości rezonansowe w przypadku patologii związanych ze wzrostem sztywności układu przewodzącego (np. w otosklerozie), a wartości niższe dotyczą sytuacji klinicznych z dominującym efektem masy (np. brak ciągłości łańcucha kosteczek). Tym samym metoda ta może być pomocna w diagnostyce różnicowej takich stanów jak brak ciągłości łańcucha kosteczek słuchowych czy nadmierna wiotkość błony bębenkowej.

Znaczącymi ograniczeniami tympanometrii częstotliwości rezonansowej są istotne różnice osobnicze, nie pozwalające na stworzenie zakresów normatywnych. Wydaje się więc, że ta metoda pomiaru może znajdować zastosowanie w monitorowaniu przebiegu choroby ucha środkowego u danego chorego (np. progresji zmian otosklerotycznych).

Pomiar absorbancji (*wideband absorbance*, WBA). Absorbancja określa wartość energii akustycznej jak została zaabsorbowana przez struktury ucha środkowego. Możemy inaczej określić ją jako stosunek energii zaabsorbowanej do energii wyemitowanej. Dotychczasowe doniesienia na temat zastosowania tej metody wskazują na jej znaczną przydatność zwłaszcza w diagnostyce stanów takich jak podciśnienie w jamie bębenkowej, wysiękowe zapalenie ucha środkowego, otosklerozę, nadmierna wiotkość błony bębenkowej, brak ciągłości łańcucha kosteczek czy przetoka na kanale półkolistym. Możliwość porównania otrzymanych danych



Ryc. 1. Tympanogram 3D

z opracowanymi wartościami referencyjnymi dla poszczególnych grup wiekowych jest niewątpliwym atutem tej procedury [5, 6] (ryc. 2). Pamiętać należy jednak, że w chwili obecnej zakresy norm są dedykowane dla konkretnego urządzenia. Szczególne zainteresowanie wzbudza możliwość dokonywania pomiarów nie wymagających stosowania zmian ciśnienia co pozwala na wykorzystanie tej formy badania tympanometrycznego w grupach pacjentów z perforacją błony bębenkowej oraz po założeniu drenażu wentylacyjnego.

Celem pracy była próba oceny przydatności klinicznej pomiaru WBA w diagnostyce i monitorowaniu pooperacyjnym u pacjentów z wysiękowym zapaleniem ucha środkowego (*chronic otitis media with effusion*, COME).

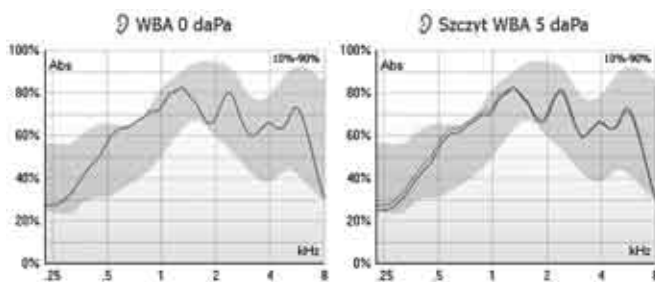
Materiał i metody

Grupę badaną stanowiło 12 dzieci z obustronnym niedosłuchem o charakterze przewodzeniowym występującym w przebiegu przewlekłego wysiękowego zapalenia ucha środkowego (COME). Rozpoznanie postawiono każdorazowo na podstawie wywiadu, badania laryngologicznego z uwzględ-

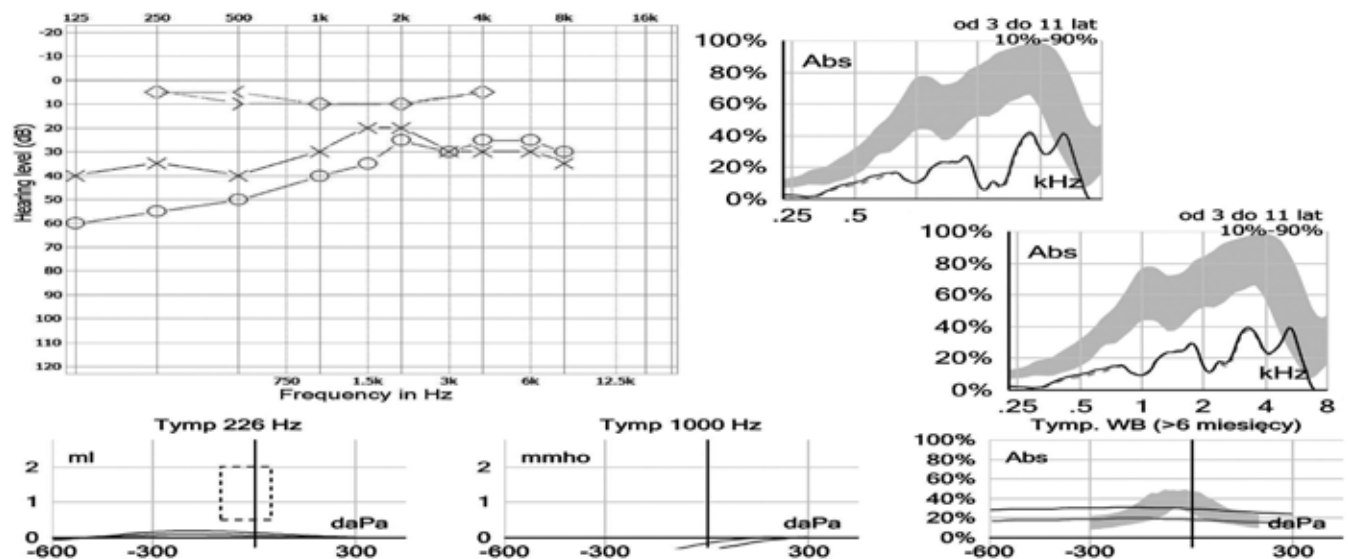
nieniem mikrotoskopii oraz oceny audiologicznej. Badania słuchu obejmowały: rejestrację produktów zniekształceń nieliniowych ślimaka (*Distortion product otoacoustic emissions*, DPOAE), audiometrię impedancyjną z zastosowaniem bodźca w postaci czystego tonu o częstotliwości 226 Hz (IA – 226 Hz), w wybranych przypadkach (u 10 współpracujących chorych) audiometrię tonalną progową (*Pure Tone Audiometry*, PTA). U wszystkich pacjentów przeprowadzono pomiary absorbancji w oparciu o metodę tympanometrii szerokopasmowej z zastosowaniem urządzenia Titan (Interacoustics, Denmark). Badanie absorbancji przeprowadzono przedoperacyjnie oraz w okresie pooperacyjnym (4 tygodnie po zabiegu). COME we wszystkich przypadkach potwierdzono śródoperacyjnie. Dokonano analizy otrzymanych wyników pod kątem przydatności klinicznej stosowania pomiarów absorbancji metodą tympanometrii szerokopasmowej u dzieci.

Wyniki

W grupie badanej wartości absorbancji rejestrowane w okresie przedoperacyjnym były niższe od wartości normatywnych. Jednakże, zakres obniżenia krzywej nie był jednakowy w całym zakresie częstotliwości dla wszystkich chorych. Wobec powyższego, z grupy 10 chorych (20 uszu), u których udało się przeprowadzić przedoperacyjne badanie PTA, wyróżniono na jego podstawie przypadki z rezerwą ślimakową (ABG) >20 dB (15 uszu) oraz uszy w których wielkość rezerwy wynosiła <20 dB (5 uszu). Zaobserwowano trend, iż zmiany wysiękowe współistniejące z niedosłuchem cechowały się znacznym obniżeniem krzywych w całym zakresie częstotliwości (ryc. 3). W odróżnieniu, w uszach któ-



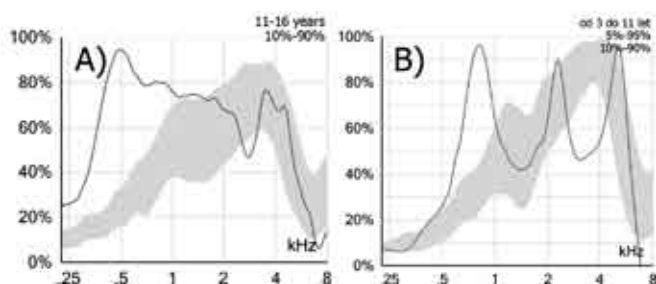
Ryc. 2. Prawidłowy zapis pomiaru absorbancji



Ryc. 3. Typowy zapis absorbancji w przebiegu wysiękowego zapalenia ucha środkowego

rych wartość ABG mieściła się w granicach normy obniżenie krzywej absorbancji dotyczyło głównie niższych częstotliwości do 1 kHz, natomiast poziom absorbancji w zakresie częstotliwości >2 kHz pozostawał w granicach normy.

Kontrolny pomiar absorbancji wykonany 4 tygodnie po zabiegu operacyjnym wskazywał w 20 przypadkach na uniesienie krzywych w zakresie <2 kHz. W 6 uszach wyniki pomiarów mieściły się w zakresie typowym dla normalnie słyszących uszu, natomiast w 14 uszach zapis charakteryzował się poziomem absorbancji przewyższającym wartości referencyjne dla częstotliwości <1 kHz (ryc. 4A), w tym w 6 przypadkach obserwowano trójszczytowy wykres absorbancji (ryc. 4B). W 2 przypadkach zapis nie uległ istotnej poprawie, w kolejnych 2 pozostawał niewiarygodny ze względu na występujące problemy techniczne (aparatura sygnalizowała brak sondy w uchu przy jej prawidłowym umiejscowieniu).



Ryc. 4. Wykresy absorbancji po założeniu drenażu transtympanalnego

Dyskusja

Intensywne badania nad wykorzystaniem tonów o różnych częstotliwościach zostały wymuszone ograniczeniami klasycznej tympanometrii. Mając na uwadze znaczącą częstość występowania niedosłuchów przewodzeniowych istniała paląca potrzeba dostarczenia większej ilości informacji na temat stanu ucha środkowego, co jest niezwykle istotne zwłaszcza w populacji dziecięcej. Znaczący wkład należy przypisać badaniom Keefe i wsp. [4]. Kolejne doniesienia podkreślały korzyści płynące z zastosowania bodźca szerokoczęstotliwościowego w tympanometrii [7, 8]. Liczni autorzy wskazują na dużą wartość diagnostyczną WBT, a w szczególności pomiarów absorbancji, w odniesieniu do niedosłuchów przewodzeniowych [9-13]. Wśród niewątpliwych zalet tej metody wymienia się większą dokładność pomiarów zwłaszcza dla wyższych częstotliwości [14]. Aktualne możliwości techniczne pozwalają na pomiar absorbancji zarówno w warunkach szczytowego ciśnienia bębenkowego jak i ciśnienia otaczającego. Jak zauważają Keefe i Simmons, pomiary ab-

sorbancji, podobnie jak pomiary odruchów z mięśni strzemiączkowych, powinny być przeprowadzane przy szczytowym ciśnieniu bębenkowym ze względu na prezentowaną w tych przypadkach największą czułość w stosunku do potencjalnych patologii ucha środkowego [10]. Jednakże nie do przecenienia zaletą WBT jest możliwość dokonywania pomiarów nie wymagających stosowania ciśnienia ze względu na możliwość ich przeprowadzenia w grupie chorych będących bezpośrednio po zabiegu operacyjnym, z ubytkiem błony bębenkowej, a zwłaszcza w grupie pacjentów pediatrycznych z obecnością drenów tympanostomijnych.

Badania Ellison i wsp. w sposób jednoznaczny wskazują na wysoką skuteczność pomiarów absorbancji w diagnostyce OMS (*otitis media secretoria*) [15]. Voss i wsp. podejmują problem usystematyzowania wyników absorbancji w zależności od szczególnej sytuacji klinicznej związanej z wystąpieniem niedosłuchu przewodzeniowego (ujemne ciśnienie w jamie bębenkowej, płyn w uchu środkowym, fiksacja strzemiączka, brak ciągłości łańcucha kosteczek, perforacja błony bębenkowej) [16]. Wyniki naszych badań dotyczących pomiarów absorbancji w przypadku założonego drenażu wentylacyjnego jam bębenkowych wskazują na występowanie charakterystycznych zapisów graficznych absorbancji, opisywanych uprzednio przez innych autorów, jak również dostępnych w materiałach referencyjnych dostarczonych przez producenta urządzenia. Zwracają uwagę przypadki, w których w okresie pooperacyjnym wykres absorbancji sugeruje dysfunkcję drenu transtympanalnego. Wydaje się istotne zwrócenie szczególnej uwagi na atraumatyczne procedury postępowania śród- i pooperacyjnego mające na celu ograniczenie wystąpienia okoliczności sprzyjających niedrożności drenu wentylacyjnego. Wyniki naszych badań dotyczące wykorzystania absorbancji są dalece zachęcające, jednakże ostateczne wnioski poparte rzetelną analizą statystyczną wymagają przeprowadzenia badania na dużych grupach chorych.

Poza klinicznymi przypadkami COME w kręgu zainteresowania badaczy pozostaje wykorzystanie pomiarów tympanometrii szerokopasmowej w badaniach przesiewowych słuchu u noworodków i oceny narządu słuchu u młodszych dzieci, głównie ze względu na fakt, iż słabą stroną OAE (*otoacoustic emission*, emisja otoakustyczna) jest jej znaczna zależność od zmian w obrębie ucha środkowego. Z drugiej strony skuteczność standardowej tympanometrii w identyfikacji wysięku w jamie bębenkowej jest niewystarczająca. Wnioski dotyczące korelacji wyników WBT w odniesieniu do badań OAE i ABR (*Auditory Brainstem Response*, słuchowe potencjały wywołane pnia mózgu) oraz przydatno-

ści tej metody na podstawie oceny ponad 2000 uszu przedstawili Keefe i wsp. [17, 18]. Również Sanford i wsp. oraz Hunter i wsp. wskazują na pomiar absorbancji jako wskaźnik lepiej korelujący z rejestracją OAE niż tympanometria z wykorzystaniem bodźca o częstotliwości 1000 Hz u noworodków [5, 19]. Wyniki powyższych badań zachęcają do poszukiwania możliwości wykorzystania WBT w skrinigu noworodkowym.

Badania tympanometryczne z użyciem bodźca o szerokim zakresie częstotliwości prowadzono również u pacjentów z otosklerozą. Valvik i wsp. wykazali spadek wartości częstotliwości rezonansowej u pacjentów po operacji otosklerozy w porównaniu z oceną przedoperacyjną wskazując na użyteczność tej metody w diagnostyce otosklerozy [20]. Obserwacje te znajdują również potwierdzenie w badaniach Shahnaz i wsp. [21]. Autorzy sugerują wzrost odsetka rozpoznawalności otosklerozy przy wzbogaceniu pomiarów tympanometrycznych o tympanometrię częstotliwości rezonansowej oraz pomiary absorbancji [22].

Pierwsze doniesienia dotyczące konieczności zastosowania bodźca o innej specyfikacji częstotliwościowej w przypadku podejrzenia braku ciągłości łańcucha kosteczek słuchowych pochodzą od Liden i wsp., którzy wskazują większe korzyści z zastosowania bodźca o częstotliwości 800 Hz w porównaniu do 200 Hz [23].

Ciekawe konkluzje badań przeprowadzonych z wykorzystaniem pomiarów absorbancji u osób w różnym wieku, prezentują Feeney i Sanford [24]. Autorzy potwierdzają wyższe wartości absorbancji w pomiarach WBT u osób po 60 roku życia w po-

równaniu do młodych dorosłych, co wskazuje na zmniejszanie sztywności układu przewodzącego ucha wraz z wiekiem. Zależności tej nie obserwowano przy pomiarach z wykorzystaniem klasycznej tympanometrii (226 Hz). Pomiary absorbancji stwarzają również możliwość oceny skuteczności operacji ossikuloplastycznych [25].

W aktualnej formie badania z zastosowaniem tympanometrii szerokopasmowej są niewątpliwie nową, zachęcającą metodą diagnostyczną, jednakże dostępną jedynie w nielicznych ośrodkach klinicznych w Polsce.

Wnioski

1. Metoda tympanometrii szerokopasmowej wydaje się być obiecującą alternatywą dla klasycznych pomiarów audiometrii impedancyjnej zwłaszcza w populacji dziecięcej.
2. Prowadzenie pomiarów absorbancji bez zmian ciśnienia stwarza możliwość wykorzystania tej metody w monitorowaniu efektów leczenia bezpośrednio w okresie pooperacyjnym.
3. Istotny odsetek wyników pomiarów absorbancji, typowych dla istniejącej niedrożności drenu transtympanalnego, wskazuje na konieczność stosowania technik operacyjnych i postępowania okołoperacyjnego ukierunkowanego w sposób szczególny na prawidłowe funkcjonowanie drenazu wentylacyjnego.

Podziękowania

Autorzy wyrażają swoje podziękowania dla firmy Oticon za udostępnienie aparatury do pomiaru WBT.

Piśmiennictwo

1. Margolis RH, Hunter LL. Acoustic immittance measurements. (w) Roeser RJ, Valente M, Hosford-Dunn H (red.). *Audiology: Diagnosis*. New York: Thieme 2000: 381-423.
2. ASHA. *Guidelines for audiologic screening*. Rockville, MD: American Speech-Language-Hearing Association 1997.
3. Nozza R, Bluestone C, Kardatzke D, Bachman R. Identification of middle ear effusion by aural acoustic admittance and otoscopy. *Ear Hear* 1994, 15(4): 310-23.
4. Keefe DH, Bulen JC, Arehart KH, Burns EM. Ear-canal impedance and reflection coefficient in human infants and adults. *J Acoust Soc Am* 1993, 94(5): 2617-38.
5. Sanford CA, Keefe DH, Liu Y, Fitzpatrick D, McCreery RW, Lewis DE, et al. Sound conduction effects on DPOAE screening outcomes in newborn infants: Test performance of wideband acoustic transfer functions and 1-kHz tympanometry. *Ear Hear* 2009, 30(6): 635-52.
6. Liu YW, Sanford CA, Ellison JC, Fitzpatrick DF, Gorga MP, Keefe DH. Wideband absorbance tympanometry using pressure sweeps: System development and results on adults with normal hearing. *J Acoust Soc Am* 2008, 124(6): 3708-19.
7. Margolis RH, Goycoolea HG. Multifrequency tympanometry in normal adults. *Ear Hear* 1993, 14(6): 408-13.
8. Margolis RH, Saly GL, Keefe DH. Wideband reflectance tympanometry in normal adults. *J Acoust Soc Am* 1999, 106(1): 265-80.
9. Piskorski P, Keefe DH, Simmons JL, Gorga MP. Prediction of conductive hearing loss based on acoustic ear-canal response using a multivariate clinical decision theory. *J Acoust Soc Am* 1999, 105(3): 1749-64.
10. Keefe D, Simmons J. Energy transmittance predicts conductive hearing loss in older children and adults. *J Acoust Soc Am* 2003, 114(6): 3217-38.

11. Prieve BA, Feeney MP, Stenfelt S, Shahnaz N. Prediction of conductive hearing loss using wideband acoustic immittance. *Ear Hear* 2013, 34(Suppl 1): 54S-59S.
12. Keefe DH, Sanford CA, Ellison J, Fitzpatrick DF, Gorga MP. Wideband aural acoustic absorbance predicts conductive hearing loss in children. *Int J Audiol* 2012, 51(12): 880-92.
13. Prieve BA, Van der Werff KR, Preston JL, Georgantas L. Identification of conductive hearing loss in young infants using tympanometry and wideband reflectance. *Ear Hear* 2013, 34(2): 168-78.
14. Voss SE, Allen JB. Measurement of acoustic impedance and reflectance in the human ear canal. *J Acoust Soc Am* 1994, 95(1): 372-84.
15. Ellison JC, Gorga M, Cohn E, Fitzpatrick D, Sanford CA, Keefe DH. Wideband Acoustic Transfer functions predict middle ear effusions. *Laryngoscope* 2012, 122(4): 887-94.
16. Voss SE, Merchant GR, Horton NJ. Effects of middle-ear disorders on power reflectance measured in cadaveric ear canals. *Ear Hear* 2012, 33(2): 195-208.
17. Keefe DH, Zhao F, Neely ST, Gorga MP, Vohr BR. Ear-canal acoustic admittance and reflectance effects in human neonates. I. Predictions of otoacoustic emission and auditory brainstem responses. *J Acoust Soc Am* 2003, 113(1): 389-406.
18. Keefe DH, Folsom RC, Gorga MP, Vohr BR, Bulen JC, Norton SJ. Identification of neonatal hearing impairment: Ear canal measurements of acoustic admittance and reflectance in neonates. *Ear Hear* 2000, 21(5): 443-61.
19. Hunter LL, Feeney MP, Lapsley Miller JA, Jeng PS, Bohning S. Wideband Reflectance in Newborns: Normative Regions and Relationship to Hearing-Screening Results. *Ear Hear* 2010, 31(5): 599-610.
20. Valvik B, Johnsen M, Laukli E. Multifrequency tympanometry. Preliminary experiences with a commercially available middle-ear analyzer. *Audiology* 1994, 33(5): 245-53.
21. Shahnaz N, Polka L. Standard and multi-frequency tympanometry in normal and otosclerotic ears. *Ear Hear* 1997, 18(4): 268-80.
22. Shahnaz N, Bork K, Polka L, Bell D, Westerberg BD. Energy reflectance and tympanometry in normal and otosclerotic ears. *Ear Hear* 2009, 30(2): 219-33.
23. Liden G, Harford E, Hallen O. Tympanometry for the diagnosis of ossicular disruption. *Arch Otolaryngol* 1974, 99(1): 23-9.
24. Feeney MP, Sanford CA. Age effects in the human middle-ear: Wideband acoustical measures. *J Acoust Soc Am* 2004, 116(6): 3546-58.
25. Feeney MP, Grant IL, Mills DM. Wideband energy reflectance measurements of ossicular chain discontinuity and repair in human temporal bone. *Ear Hear* 2009, 30(4): 391-400.