

Jacek Smurzyński

Klinika Otolaryngologiczna
Uniwersytet i Szpital Kantonalny w Bazylei, Szwajcaria

Podstawy badań otoemisji akustycznej*

Fundamentals of Otoacoustic Emissions

Streszczenie

Otoemisje akustyczne są to dźwięki, które odzwierciedlają aktywne i nieliniowe procesy zachodzące w ślimaku. Użycie specjalnej aparatury i techniki pomiarowej umożliwia pomiar tych sygnałów w przewodzie słuchowym zewnętrznym. Wyniki badań dowodzą, że źródłem powstawania otoemisji akustycznych są drgania komórek rzęsatych zewnętrżnych.

W niniejszej pracy omówiono różne rodzaje sygnałów otoemisji (spontaniczne i wywołane) oraz wpływ artefaktów i stanu ucha środkowego na wyniki testów otoemisji. Przedstawiono również możliwości zastosowań klinicznych otoemisji w badaniach przesiewowych słuchu u noworodków, w monitorowaniu funkcji ślimaka i różnicowaniu pomiędzy ubytkami słuchu pochodzenia ślimakowego i pozaślimakowego.

Summary

Otoacoustic emissions (OAEs) are sounds measured in the external ear canal that reflect active and nonlinear processes of the cochlea. It is commonly assumed that the motility of the outer hair cells plays a significant role in generating OAEs.

This brief review contains a short description of different types of OAEs (spontaneous and evoked). Several technical aspects and sources of artifacts are summarized, including the influence of middle ear function on OAE measurements. Potential clinical applications of OAEs in infant hearing screening programs, monitoring of cochlear function, and differentiation between cochlear and retrocochlear pathology are briefly reviewed.

* Niniejsza praca została przygotowana w ramach grantu Schweizerischer Nationalfonds No 3200-042241.94/1. Autor pragnie wyrazić wdzięczność dr. Krzysztofowi Kochankowi za cenne uwagi oraz Komitetowi Redakcyjnemu „Audiofonologii” za pomoc w redakcji ostatecznej wersji tekstu.

Wyniki wielu badań przeprowadzonych w ciągu ostatnich dwudziestu lat spowodowały konieczność zweryfikowania wcześniejszych teorii dotyczących funkcjonowania ślimaka. Między innymi wykazano, że ślimak może nie tylko odbierać dźwięki, ale również wytwarzać energię akustyczną. W 1978 r. Kemp, jako pierwszy, zarejestrował w przewodzie słuchowym zewnętrznym dźwięki wygenerowane przez ucho wewnętrzne. Od kilkunastu lat sygnały te określane są jako otoemisje akustyczne (*otoacoustic emissions* — OAEs).

Odkrycie OAEs było ważne z wielu względów. Po pierwsze, występowanie OAEs dowiodło, że ślimak nie jest elementem pasywnym, lecz występują w nim procesy aktywne, co znacznie ułatwiło wyjaśnienie wysokiej wrażliwości i selektywności częstotliwościowej ślimaka, znanej od wielu lat. Badania anatomiczne i fizjologiczne prowadzone dla zinterpretowania procesów aktywnych doprowadziły do odkrycia elektroruchowych właściwości komórek rzęsatych zewnętrznych (*outer hair cells* — OHCs), odgrywających rolę wzmacniaczy wewnątrzślimakowych. Po drugie, pojawiła się metoda umożliwiająca nieinwazyjny i bezpośredni pomiar funkcjonowania ślimaka, co zdawało się otwierać drogę do wielu zastosowań klinicznych. Otoemisje odzwierciedlają funkcjonowanie obwodowego układu słuchowego i są wrażliwe na czynniki powodujące różne patologie ucha wewnętrznego (np. hałas, leki ototoksyczne, *presbycusis*). Dlatego w wielu sytuacjach test OAE może być ważnym elementem kompleksowego badania narządu słuchu w połączeniu z audiometrią konwencjonalną, impedancyjną i badaniem np. słuchowych potencjałów wywołanych (ABR).

Odkrycie OAEs w 1978 r. zainspirowało wiele ośrodków do podjęcia prac badawczych i stąd w przeciągu ostatnich kilkunastu lat ukazało się kilka tysięcy prac z zakresu OAEs. Ich wyniki pozwoliły odpowiedzieć na szereg pytań dotyczących fizjologii ślimaka. Całościowe wyjaśnienie zjawisk związanych z powstawaniem OAEs nie jest jednak nadal możliwe. Nie jest to także w zadaniu tej krótkiej pracy, w której za cel postawiono zwięzłe omówienie podstawowych zagadnień związanych z pomiarem oraz interpretacją OAEs (przegląd literatury z tej dziedziny omawiają m.in. Probst [1990] oraz Lonsbury-Martin i inni [1995]).

I. RODZAJE OTOEMISJI AKUSTYCZNYCH

Szereg badań eksperymentalnych przeprowadzonych na zwierzętach, jak również wyniki badań klinicznych dowodzą, że komórki rzęstate zewnętrzne, mające właściwości elektroruchowe, odgrywają główną rolę w procesie generacji otoemisji akustycznych. Energia mechaniczna wytworzona w ślimaku jest przenoszona w kierunku zewnętrznym poprzez ucho środkowe do błony

bębenkowej. Drgania błony bębenkowej wytwarzają sygnał akustyczny, określany jako otoemisja akustyczna, który może być zarejestrowany w przewodzie słuchowym zewnętrznym przy użyciu czułego mikrofonu i zastosowaniu specjalnych metod analizy sygnałów.

Zasadniczo OAEs dzielą się na dwie grupy:

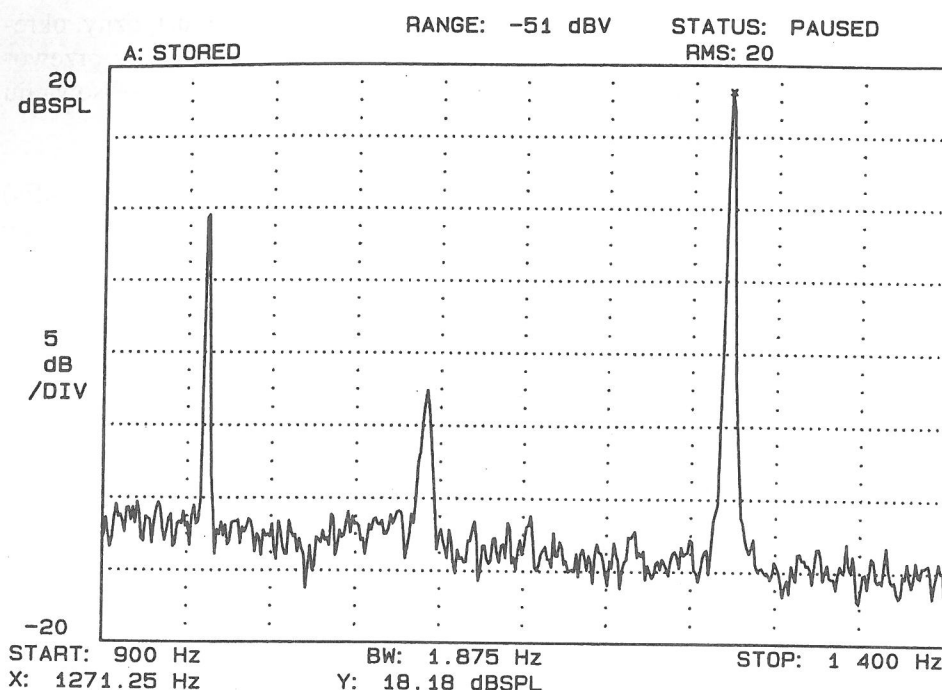
a) otoemisje spontaniczne (*spontaneous otoacoustic emissions* — SOAEs) — wykrywane w przewodzie słuchowym zewnętrznym w sytuacji, gdy ucho nie jest poddawane żadnej stymulacji akustycznej;

b) otoemisje wywołane (*evoked otoacoustic emissions* — EOAEs) — rejestrowane w przewodzie słuchowym zewnętrznym jako „odpowiedź” ucha na stymulację akustyczną; rodzaj bodźca pobudzającego (impuls, ton prosty, dwuton) decyduje o charakterystyce OAE i jest podstawą do dalszej, bardziej szczegółowej klasyfikacji.

II. OTOEMISJE SPONTANICZNE

Pomiar SOAEs odbywa się poprzez umieszczenie w przewodzie słuchowym zewnętrznym miniaturowego, czułego i niskoszumowego mikrofonu, będącego zasadniczym elementem sondy, szczelnie dopasowanej do ścian przewodu słuchowego zewnętrznego. Sygnał mikrofonu, odpowiadający ciśnieniu akustycznemu w przewodzie słuchowym, poddawany jest uśrednieniu w celu zmniejszenia poziomu szumu zakłóceń oraz analizie widmowej dla identyfikacji wąskopasmowych sygnałów generowanych spontanicznie przez ślimak — SOAEs. Na ryc. 1 przedstawiono przykładowy zapis widma (w zakresie częstotliwości 900-1400 Hz) uśrednionego sygnału, który charakteryzuje się występowaniem szeregu SOAEs. Lokalne maksima w widmie odpowiadają SOAEs zarejestrowanym w okolicach 961 Hz (o poziomie +9.6 dB SPL), 1091 Hz (-2.6 dB SPL) i 1271 Hz (+18.2 dB SPL).

Wyniki badań [Bilger (i inni) 1990] wykazały, że: 1) procent wykrywalności SOAEs zależy w dużym stopniu od czułości stosowanej aparatury i metody analizy sygnału mikrofonu; 2) SOAEs występują u 30-60% osób o słuchu prawidłowym, co ogranicza ich zastosowanie kliniczne; 3) SOAEs występują częściej w prawym niż w lewym uchu oraz częściej u kobiet niż u mężczyzn; 4) poziom ciśnienia akustycznego SOAEs generalnie nie przekracza +20 dB SPL; 5) SOAEs nie występują (poza wyjątkowymi przypadkami) w rejonach częstotliwości, gdzie próg słuchu w audiometrii tonalnej jest wyższy niż 20 dB HL. Emisje spontaniczne u dorosłych występują najczęściej w paśmie pomiędzy 1 i 2 kHz. Częstotliwości SOAEs są stabilne i zmieniają się w granicach do ok. 1% na przestrzeni kilku miesięcy. U niemowląt SOAEs występują najczęściej w paśmie pomiędzy 2.5 i 5 kHz i mają średnio o ok. 10 dB wyższy poziom niż u dorosłych [Burns (i inni) 1992].

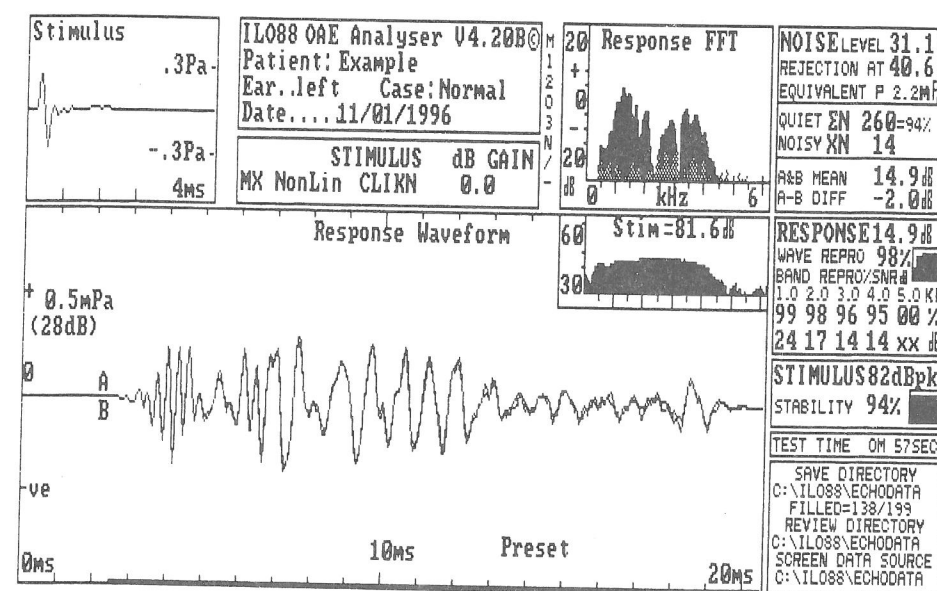


Ryc. 1. Przykład otoemisji spontanicznych (SOAEs) zmierzonych przy użyciu analizatora widma Hewlett-Packard 3561A i mikrofonu Etymotic Research ER-10A. Uśrednione widmo ($n = 20$) wykazuje trzy SOAEs w paśmie pomiędzy 900 i 1400 Hz. Kursor („x”) wskazuje SOAE o częstotliwości ok. 1271 Hz i poziomie ciśnienia ok. +18.2 dB SPL

Początkowo uważano, że SOAEs mogą być pomocne w postępowaniu klinicznym u pacjentów cierpiących na szumy uszne. Penner [1992] wykazała, że korelacje pomiędzy SOAEs i *tinnitus* występują jedynie u ok. 4% pacjentów.

III. OTOEMISJE WYWOŁANE IMPULSAMI

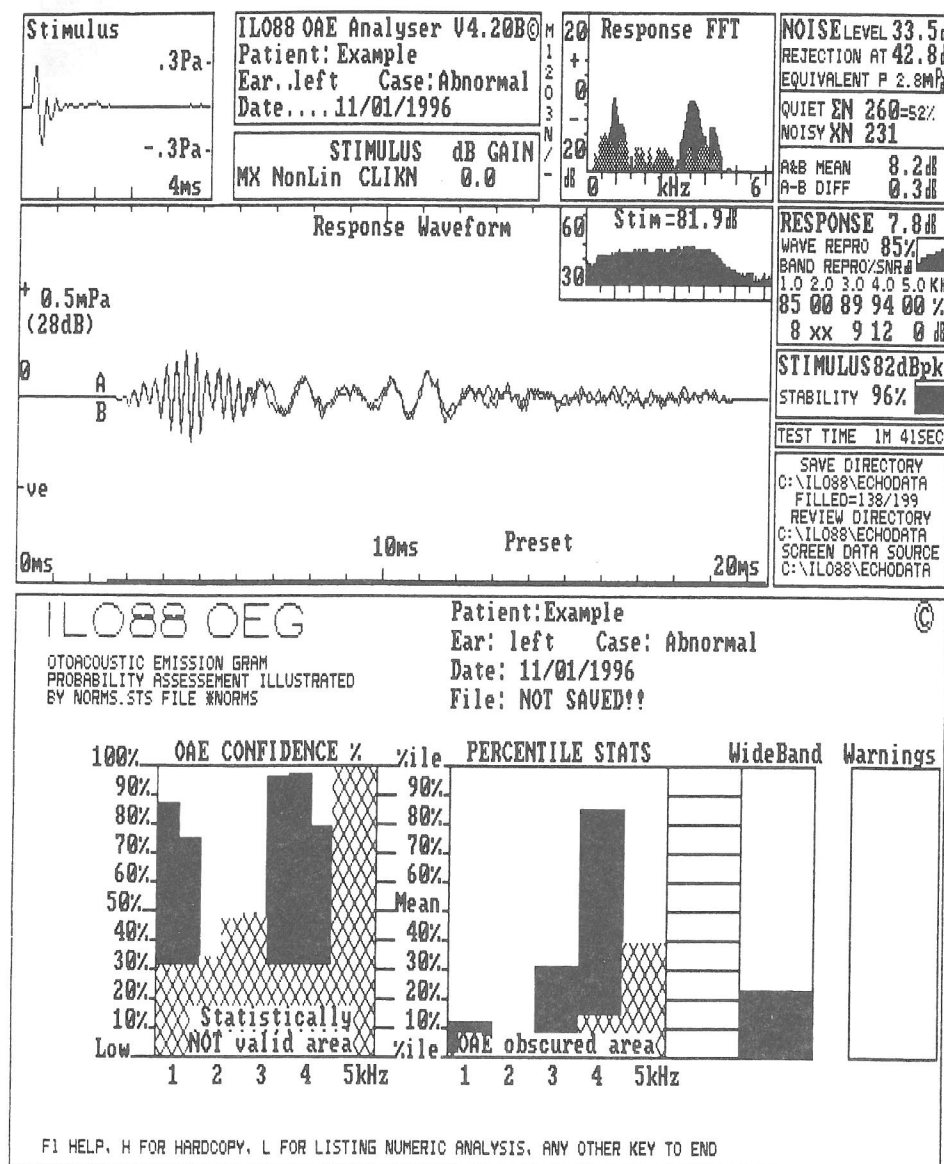
Dotychczas najszerze zastosowanie znalazła metoda rejestracji otoemisji wywołanych trzaskiem (*click-evoked otoacoustic emissions* — CEOAEs), wykorzystywana m.in. w systemie ILO88 firmy Otodynamics. Bodziec jest wytwarzany przez miniaturową słuchawkę, natomiast miniaturowy mikrofon, stanowiący drugi element sondy pomiarowej, rejestruje sygnał zawierający CEOAEs i szum zakłócający. Sygnał ten poddawany jest procesowi uśrednienia (analogicznie do metody słuchowych potencjałów wywołanych) w celu poprawy stosunku sygnału (CEOAEs) do szumu. Zastosowanie tzw. szybkiej transformaty Fouriera (FFT) umożliwia obliczenie widma CEOAEs i widma szumu. Na ryc. 2 przedstawiono przykładowy zapis CEOAEs, uzy-



Ryc. 2. Przykładowy wydruk otoemisji wywołanych trzaskiem (CEOAEs), otrzymanych przy użyciu systemu ILO88 u młodej osoby dorosłej o słuchu prawidłowym

skany za pomocą systemu ILO88 u młodej osoby dorosłej o słuchu prawidłowym (szczegółowy opis systemu ILO88 podaje Hauser [1995]). Centralny panel zapisu reprezentuje uśredniony przebieg czasowy odpowiedzi ślimaka (CEOAEs), będącej opóźnionym i nieliniowym „echem” generowanym przez aktywne i nieliniowe mikromechanizmy ślimaka w odpowiedzi na krótkie pobudzenie. Ponieważ krótki impuls (trzask o czasie trwania 80 μ s) jest sygnałem o szerokim widmie, zbiór wielu częstotliwości jest przekazywany jednocześnie do ślimaka (widmo impulsu obrazuje zaczerpniony obszar w prostokącie „Stim” na ryc. 2, gdzie podana jest również wartość szczytowa pobudzenia — 81.6 dB SPL). Analiza FFT zapewnia uzyskanie informacji dotyczących funkcjonowania ślimaka w różnych zakresach częstotliwości. Typowe widmo CEOAEs zawiera w zakresie 500-5000 Hz kilka rejonów o szerokości kilkuset Hz, gdzie otoemisja (zaczerpniony obszar w prostokącie „Response FFT”) występuje znacznie powyżej szumu tła (obszar zakreskowany). Analiza przebiegu czasowego CEOAEs wykazuje skrócenie czasu latencji wraz ze wzrostem częstotliwości CEOAEs. Składowe widma CEOAEs w zakresie wyższych częstotliwości (np. 4 kHz) charakteryzują się krótkim czasem latencji (rzędu 4 ms), a składowe o niższych częstotliwościach (np. 1 kHz) charakteryzują się dłuższym czasem latencji (rzędu 10 ms). Ta cecha sugeruje, że miejsce generacji CEOAEs przesuwa się wraz ze wzrostem częstotliwości w kierunku części podstawnej ślimaka.

Generalnie CEOAEs występują niemal u 100% osób o słuchu prawidłowym w szerokim przedziale wiekowym, od noworodków aż po osoby w wieku do ok. 60 lat [Probst 1990; Musiek (i inni) 1994]. Porównanie różnych grup wiekowych wykazało jednak, że niemowlęta charakteryzują się wyższym poziomem CEOAEs w porównaniu z dziećmi i osobami dorosłymi.



Ryc. 3. Zapis CEOAE lewego ucha u pacjentki z ubytkami słuchu rzędu 30-35 dB w zakresie 1-3 kHz. Dolna część przedstawia porównanie wyników z normą opracowaną na podstawie CEOAEs uzyskanych dla 70 młodych osób dorosłych o słuchu prawidłowym

Wraz ze wzrostem wieku następuje stopniowe zmniejszanie się CEOAEs w rejonie wysokich częstotliwości [Musiek (i inni) 1994]. Wyniki tych badań sugerują, że niezbędne jest opracowanie odrębnych norm dla poszczególnych grup wiekowych, tzn. dla niemowląt, dzieci i dorosłych. Poziomy CEOAEs są nieco wyższe u kobiet niż u mężczyzn, co jest przypisywane częstszemu występowaniu otoemisji spontanicznych u kobiet. Lewe i prawe ucho tej samej osoby o słuchu prawidłowym wykazują podobieństwa widma CEOAEs. Z drugiej strony — każde ucho generuje niezwykle specyficzne widmo CEOAEs (cecha ta jest często porównywana do specyfiki odcisków palców). Stanowi to źródło dużych różnic międzysobniczych i stwarza konieczność opracowania norm opartych na dość dużej populacji osób o słuchu prawidłowym.

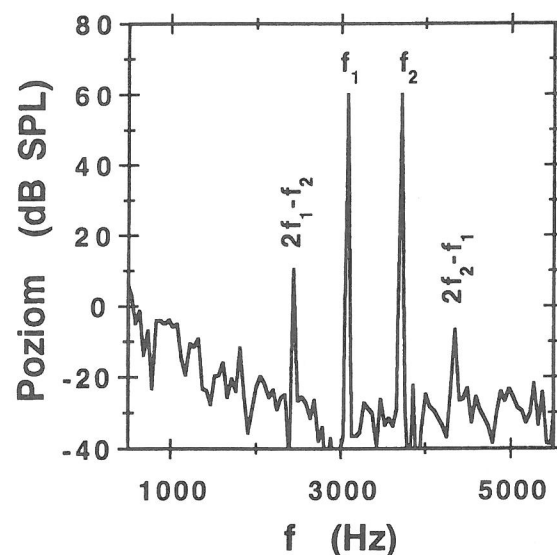
Szereg badań wykazało, że poziom CEOAEs ulega zmniejszeniu lub CEOAEs zanikają całkowicie w przypadku ubytków zmysłowo-nerwowych. Konserwatywnie zakłada się, że obecność CEOAEs świadczy o tym, iż próg słuchu jest na poziomie lepszym niż 30 dB HL w zakresie częstotliwości odpowiadającym widmu CEOAEs [Hauser 1995]. Na ryc. 3 przedstawiono zapis CEOAEs lewego ucha u 23-letniej kobiety (próg słuchu w audiometrii tonalnej 10-15 dB HL w zakresie 125-750 Hz i 4-8 kHz; 30-35 dB HL w zakresie 1-3 kHz). Widmo CEOAEs zawiera dość silne składowe w pasmach 700-1200 Hz i 3.2-5 kHz. W zakresie pomiędzy 1.2 i 3.2 kHz widmo CEOAEs jest niewykrywalne na tle szumu. Dolna część ryc. 3 ilustruje porównanie wyników pacjentki z normą opracowaną dla grupy 70 osób o słuchu prawidłowym w wieku 16-30 lat. Środkowy panel przedstawia wartości centylowe poziomów CEOAE uśrednionych w pasmach o szerokości 1 kHz i częstotliwościach środkowych 1, 2, 3 i 4 kHz.

Wyniki szeregu prac dowodzą, że istnieje zgodność pomiędzy widmem CEOAEs i wartościami progowymi słuchu [Collet (i inni) 1991], ale korelacja ta nie jest zbyt wysoka. Dane opublikowane przez Prieve i jej współpracowników [1993] sugerują, że w zakresie częstotliwości 2-4 kHz metoda CEOAE dość dobrze różnicuje osoby o słuchu prawidłowym od osób z ubytkami słuchu. Różnicowanie to jest jednak niewystarczające dla częstotliwości ok. 1 kHz i niemal zerowe dla 500 Hz. Należy ponadto pamiętać, że otoemisje są odbiciem funkcji części obwodowej układu słuchowego i generalnie rzecz biorąc — są niezależne od funkcjonowania części ośrodkowej.

IV. OTOAKUSTYCZNE EMISJE ZNIEKSZTAŁCEŃ

Inny rodzaj EOAEs, tzw. otoakustyczne emisje zniekształceń (*distortion-product otoacoustic emissions* — DPOAEs), występuje w odpowiedzi na pobudzenie bodźcem składającym się z dwóch tonów prostych (tzw. tonów

pierwotnych) o zbliżonych częstotliwościach f_1 i f_2 . Sonda do pomiaru DPOAEs, umieszczona w przewodzie słuchowym zewnętrznym, zawiera dwie miniaturowe słuchawki oraz mikrofon. Każda ze słuchawek emituje tylko jeden ton — o częstotliwości f_1 lub f_2 . Stosunek częstotliwości f_2 do f_1 waha się w granicach od 1.18 do 1.25. Czas trwania bodźca (dwutonu) wynosi ok. 1-4 sek. Sygnał z mikrofonu poddawany jest ciągłemu procesowi uśredniania podczas prezentacji bodźca, co zapewnia poprawę stosunku sygnału do szumu. Na podstawie uśrednionego sygnału mikrofonu system pomiarowy oblicza FFT i w rezultacie otrzymujemy widmo sygnału zarejestrowanego w przewodzie słuchowym zewnętrznym. Przykładowy zapis widma uzyskanego za pomocą systemu laboratoryjnego [Smurzyński (i inni) 1993] w uchu noworodka przedstawiono na ryc. 4. Widmo to zawiera szerokopasmowe tło odpowiadające szumowi zakłóceń oraz dwa prążki odpowiadające dwóm tonom o częstotliwościach ok. 3076 i 3711 Hz, emitowanym przez słuchawki. W wyniku procesów nieliniowych zachodzących w ślimaku ucho wytwarza nowe, dodatkowe częstotliwości, będące kombinacjami częstotliwości f_1 i f_2 . Są one widoczne w widmie w postaci prążków występujących dla częstotliwości $2f_1-f_2$ (ok. 2441 Hz) oraz $2f_2-f_1$ (ok. 4346 Hz) reprezentujących DPOAEs. Zdrowe ucho ludzkie wytwarza najsilniejszy sygnał DPOAEs dla częstotliwości $2f_1-f_2$. Szczegółowe badania dowiodły, że sygnał ten jest wytwarzany w ślimaku w miejscu odpowiadającym w przy-



Ryc. 4. Widmo amplitudy sygnału mikrofonu zarejestrowane w warunkach stymulacji ucha noworodka dwoma tonami prostymi o częstotliwościach $f_1 = 3076$ i $f_2 = 3711$ Hz. Widmo zawiera dwa silne prążki odpowiadające tonom pierwotnym oraz prążki odpowiadające otoemisjom zniekształceń dla częstotliwości $2f_1-f_2$ i $2f_2-f_1$. W zakresie niskich częstotliwości (poniżej 2000 Hz) występuje wzrost poziomu zakłóceń, spowodowany zwiększonym wpływem szumów fizjologicznych

bliżeniu największemu wychyleniu błony podstawnej dla częstotliwości f_2 . Metoda DPOAE pozwala więc na obiektywne zbadanie funkcjonowania ucha wewnętrznego w precyzyjnie określonym rejonie częstotliwości.

Specyfika bodźców stosowanych w metodzie DPOAE sprawia, że istnieje wiele możliwości w zakresie zmian parametrów testu. Zmianom mogą podlegać:

a) wartości częstotliwości f_1 i f_2 oraz ich stosunek;

b) poziom ciśnienia akustycznego L_1 i L_2 odpowiadający bodźcom o częstotliwościach f_1 i f_2 ; badania wykazały, że w pewnych sytuacjach korzystne jest zastosowanie bodźców, dla których wartość L_1 jest wyższa od wartości L_2 o 6-15 dB.

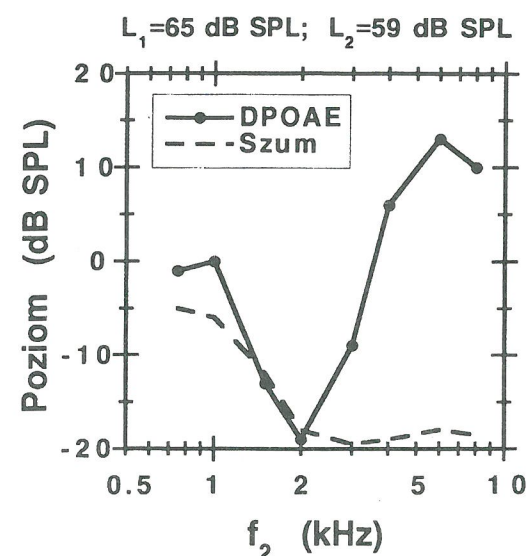
Typowy system do pomiaru DPOAE umożliwia określenie poziomu ciśnienia w przewodzie słuchowym zewnętrznym dla bodźców f_1 i f_2 oraz dla częstotliwości $2f_1-f_2$, jak również szacuje poziom tła zakłóceń poprzez uśrednienie kilku składników widma wokół częstotliwości $2f_1-f_2$. W metodzie DPOAE typowo stosuje się dwie procedury:

a) tzw. DP-gram; stosunek częstotliwości f_2 do f_1 jest niezmienny podczas trwania testu, a częstotliwości bodźców f_1 i f_2 są zmieniane skokowo w skali logarytmicznej z rozdzielczością 2-8 punktów na oktawę; wartości L_1 i L_2 są stałe w ramach danego testu;

b) funkcja wzrostu DPOAE (wejście/wyjście — *input/output*); częstotliwości bodźców f_1 i f_2 są niezmiennie w ramach danego testu; wartości L_1 i L_2 są zmieniane skokowo co 2-5 dB w zakresie 20-70 dB SPL; funkcje wzrostu mierzy się dla 6-10 wybranych par częstotliwości f_1 i f_2 , a następnie określa nachylenia funkcji oraz najmniejsze wartości L_1 i L_2 , dla których sygnał DPOAE jest wykrywalny na tle szumu (tzw. próg detekcji DPOAEs).

Wiele prac wykazało, że DPOAE występuje niemal u wszystkich osób o słuchu prawidłowym. W pracy Lonsbury-Martin i współpracowników [1991] przedstawiono szczegółowe dane dotyczące DPOAEs u osób dorosłych w wieku 31-60 lat. Wyniki wskazują, że poziom DPOAEs zmniejsza się systematycznie wraz z wiekiem dla zakresu częstotliwości powyżej 2 kHz. Również próg detekcji DPOAEs wzrasta wraz z wiekiem. Dotychczasowe badania nie wykazały systematycznych różnic pomiędzy poziomami DPOAE zmierzonymi dla grup kobiet i mężczyzn oraz pomiędzy lewym i prawym uchem. Uzyskano natomiast dość duże różnice międzypersonne, co stwarza konieczność opracowania norm opartych na dużej populacji osób o słuchu prawidłowym. Kilka prac poświęconych badaniom DPOAE u noworodków i niemowląt [np. Lasky (i inni) 1992; Smurzyński (i inni) 1993] wykazało, że poziomy DPOAE są nieco wyższe dla tej populacji niż dla osób dorosłych.

Wiele ośrodków przeprowadziło badania DPOAE u osób z ubytkami słuchu, poszukując korelacji pomiędzy charakterystykami DPOAE i danymi audiologicznymi. Między innymi Nelson i Kimberly [1992] wykazali przy-



Ryc. 5. Poziom DPOAEs (linia ciągła) w funkcji częstotliwości tonu pierwotnego f_2 , tzw. DP-gram, dla pacjentki, której CEOAE przedstawione są na ryc. 3. W zakresie średnich częstotliwości DPOAE nie są wykrywalne na tle szumu (linia przerywana), co koreluje z danymi audiologicznymi. W zakresie częstotliwości poniżej 2 kHz występuje charakterystyczny wzrost poziomu szumów fizjologicznych

datność progu detekcji DPOAE dla wykrycia ubytków słuchu pochodzenia ślimakowego. Gorga i inni [1993] przedstawili wyniki świadczące o możliwości różnicowania pomiędzy normalną i patologiczną funkcją ślimaka w zakresie 2-8 kHz przy użyciu poziomu DPOAE lub stosunku DPOAE do szumu. Różnicowanie to było jednak niezadowolające dla częstotliwości poniżej 2 kHz. Ogólnie można powiedzieć, że poziomy DPOAEs ulegają zmniejszeniu lub zanikają całkowicie w przypadku ubytków zmysłowo-nerwowych. Tradycyjnie zakłada się, że obecność DPOAEs sugeruje, iż próg słuchu jest na poziomie lepszym niż 40 dB HL w zakresie częstotliwości odpowiadającym częstotliwości bodźca f_2 . Na ryc. 5 przedstawiono tzw. DP-gram zarejestrowany dla lewego ucha pacjentki, której CEOAEs pokazane są na ryc. 3. Pomiar DPOAEs przeprowadzono z wykorzystaniem aparatury laboratoryjnej opisanej przez Roede'a i współpracowników [1993], stosując poziom pobudzenia $L_1 = 65$ dB SPL, $L_2 = 59$ dB SPL, stosunek $f_2/f_1 = 1.2$ oraz częstotliwości f_2 odpowiadające częstotliwościom stosowanym standardowo w audiometrii tonalnej. Charakterystyka DP-gramu dość dobrze koreluje z danymi progowymi. Sygnał DPOAE był niewykrywalny na tle szumu lub zredukowany dla częstotliwości 1.5-3 kHz, czyli w rejonie odpowiadającym podniesieniu progu słyszenia do wartości 30-35 dB HL.

V. ŹRÓDŁA ARTEFAKTÓW ORAZ WPŁYW FUNKCJONOWANIA UCHA ŚRODKOWEGO

Głównym czynnikiem niezbędnym do prawidłowego przeprowadzenia pomiaru EOAE jest odpowiednie umieszczenie sondy w przewodzie słuchowym zewnętrznym. Zatkanie sondy woskowiną lub jej kontakt ze ścianą przewodu uniemożliwiają utrzymanie wymaganych parametrów bodźca stymulującego oraz wpływają na charakterystykę toru pomiarowego. Nieszczelne dopasowanie sondy do przewodu powoduje zmniejszenie poziomu bodźca stymulującego (szczególnie w zakresie niskich częstotliwości) oraz zwiększa poziom zakłóceń w przewodzie słuchowym. Przy dobrym dopasowaniu sondy nie jest konieczne wykonanie badania w kabinie audiologicznej, a pomiar może być przeprowadzony w stosunkowo cichym pomieszczeniu. Zakłócenia fizjologiczne — oddech, ruchy głową, przełykanie, mowa itp. — stanowią źródła artefaktów, które mogą być częściowo eliminowane z sygnału dzięki zastosowaniu odpowiedniej techniki analizy. Jednakże w niektórych sytuacjach zakłócenia fizjologiczne znacznie utrudniają lub wręcz uniemożliwiają przeprowadzenie badania. Szczególnie trudne jest wyeliminowanie wpływu zakłóceń w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 1 kHz), tj. w rejonie, w którym zawarta jest największa część energii szumów fizjologicznych (oddech, przepływ krwi w naczyniach itd.). Wzrost poziomu szumu dla niskich częstotliwości jest widoczny w wynikach DPOAEs przedstawionych na ryc. 4 i 5.

Metoda EOAE zakłada propagację energii z przewodu słuchowego zewnętrznego poprzez ucho środkowe do ucha wewnętrznego, a następnie zwrotną transmisję ze ślimaka poprzez ucho środkowe. Dlatego czynniki, które wpływają na ograniczenie amplitudy drgań błony bębenkowej i łańcucha kosteczek, mogą zmniejszyć wielkość energii sygnału docierającego do ślimaka, jak również sygnału wytworzonego w uchu wewnętrznym. Wskazane jest więc, aby przed rozpoczęciem testu EOAE wykonać badanie otoskopowe oraz tympanogram. W przypadku, gdy wyniki otoskopii lub tympanometrii są nieprawidłowe, wyniki testu EOAE należy interpretować z dużą ostrożnością [Lonsbury-Martin (i inni) 1994]. Generalnie ucho, w którym tympanogram typu C wykazuje maksimum przesunięte w kierunku ujemnego ciśnienia w zakresie od -100 do -200 daPa, charakteryzuje się zmniejszeniem sygnału otoemisji (w stosunku do normy), szczególnie w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 2 kHz). Gdy ujemne ciśnienie przekracza -200 daPa lub tympanogram jest typu B (płaski bez wyraźnego maksimum), sygnał EOAE jest niewykrywalny, nawet w przypadku normalnego funkcjonowania ucha wewnętrznego.

ch - ch.

VI. ZASTOSOWANIA KLINICZNE OTOEMISJI AKUSTYCZNYCH

Technika wywołanych otoemisji akustycznych jest:

a) nieinwazyjna — jedynym wymaganiem jest umieszczenie w przewodzie słuchowym zewnętrznym miniaturowej sondy;

b) obiektywna i dokładna — nie jest wymagana żadna współpraca ze strony pacjenta, a uzyskane informacje dość wiernie odzwierciedlają funkcjonowanie ślimaka;

c) stosunkowo łatwa w realizacji — skomputeryzowana aparatura pozwala na przeprowadzenie testu w krótkim czasie w gabinecie audiologicznym, przy łóżku pacjenta i na sali operacyjnej.

Wkrótce po odkryciu EOAEs (w 1978 r.) wiele ośrodków badawczych zwróciło uwagę na wspomniane zalety i rozpoczęło badania dotyczące zastosowań klinicznych EOAEs w diagnostyce układu słuchowego u noworodków, niemowląt, dzieci i dorosłych, w tym także u pacjentów, których testowanie przy użyciu tradycyjnych metod audiologicznych jest trudne (np. pacjentów z zaburzeniami umysłowymi, pacjentów symulujących uszkodzenie słuchu itp.). Większość tych zastosowań nadal jest na etapie badań eksperymentalnych, ale wydaje się, że w niedalekiej przyszłości EOAEs wejdą na stałe do praktyki audiologicznej.

Ponieważ sygnał otoemisji wywołanej trzaskiem występuje u zdrowych noworodków niemal w 100% [Norton 1994], obecnie wiele badań dotyczy wykorzystania otoemisji do badań przesiewowych u noworodków pod kątem występowania wad słuchu. Ostatnio opublikowane wyniki wykazały, że EOAEs mogą być zmierzone u wcześniaków już po przekroczeniu wieku 31-32 tygodni od zapłodnienia [Smurzyński 1994]. Badanie noworodków urodzonych w terminie nie powinno być prowadzone wcześniej niż 36-48 godzin po urodzeniu, gdyż pozostałości wód płodowych w przewodzie słuchowym zewnętrznym powodują otrzymanie wyników fałszywie dodatnich w ok. 20% [Kok (i inni) 1993].

Do chwili obecnej większość programów przesiewowych opiera się na badaniach niemowląt zaliczanych do grupy zwiększonego ryzyka wystąpienia wady słuchu. Dyskusja nad możliwością zastosowania EOAEs w powszechnych badaniach przesiewowych, obejmujących wszystkie niemowlęta, jest prowadzona w wielu krajach Europy i w Stanach Zjednoczonych. Pierwszym tego typu programem jest cykl badań podjętych od kilku lat w Rhode Island, USA [White, Behrens 1993], gdzie wykorzystano test CEOAE w połączeniu z rejestracją słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu (ABR). Wstępne wyniki potwierdziły, że test CEOAE daje dobre wyniki pod względem czułości i może być z powodzeniem stosowany jako pierwszy test skriningowy wykonywany w 2-3 dobie po urodzeniu. W przypadku, gdy wynik otoemisji jest

nieprawidłowy, konieczne jest powtórzenie badania CEOAE w 3-6 tygodni później, a powtórny wynik niezgodny z normą powinien być sygnałem do kompleksowego badania, z włączeniem diagnostycznego testu ABR. Nadal brak jest w literaturze wyników testów DPOAEs przeprowadzonych na dużej populacji noworodków. Prace tego typu są w trakcie realizacji w kilku ośrodkach, a ich celem jest opracowanie optymalnego modelu badań przesiewowych z wykorzystaniem CEOAEs lub DPOAEs albo kombinacji tych dwóch testów.

W większości przypadków ubytki słuchu są spowodowane nieprawidłowym funkcjonowaniem ucha wewnętrznego. Dlatego EOAEs mogą potencjalnie znaleźć duże zastosowanie w monitorowaniu funkcji ślimaka. Jest to również możliwe dzięki dużej stabilności EOAEs w sytuacji, gdy nie występują żadne zmiany w prawidłowym funkcjonowaniu ucha środkowego. Powtarzalność wyników CEOAEs i DPOAEs dla osób o słuchu prawidłowym jest duża [Harris (i inni) 1991; Roede (i inni) 1993]. Przykładowo — zmiana poziomu DPOAEs, przekraczająca ok. 6 dB przy powtórzeniu pomiaru, sugeruje istotną zmianę w funkcjonowaniu ślimaka, przy założeniu prawidłowej funkcji ucha środkowego w trakcie obu pomiarów. Monitorowanie krótkoterminowe (na przestrzeni minut lub godzin) może być przydatne podczas zabiegów chirurgicznych [Telischi (i inni) 1995b] lub dla zbadania efektów krótkiej ekspozycji na bodźce akustyczne o dużym natężeniu [Rossi (i inni) 1991]. Przykłady zastosowań EOAEs dla monitorowania funkcji ślimaka na przestrzeni kilku dni lub tygodni obejmują badania efektów ototoksycznych występujących po zastosowaniu antybiotyków [Hotz (i inni) 1994] lub w trakcie chemoterapii [Plinkert, Kröber 1991]. Wstępne badania wykazały, że EOAEs mogą być także pomocne w ocenie pogorszenia funkcji ślimaka na przestrzeni miesięcy lub lat w wyniku długotrwałej ekspozycji na hałas w warunkach zagrożenia zawodowego [Hotz (i inni) 1993].

Telischi i inni [1995a] przeprowadzili badania CEOAEs i DPOAEs w grupie 44 pacjentów z nerwiakiem nerwu słuchowego. W większości przypadków (39 na 44) wyniki wykazały wyraźne rozgraniczenie pomiędzy uszkodzeniem typu ślimakowego i uszkodzeniem pozaślimakowym. Autorzy sugerowali, że wpływ nerwiaka na funkcjonowanie systemu słuchowego może być dwójakiego rodzaju. Po pierwsze — może wystąpić ograniczenie dopływu krwi do ślimaka, co spowoduje zaburzenie jego funkcjonowania, a tym samym zmniejszenie EOAEs. W drugim przypadku może wystąpić bezpośredni ucisk na nerw słuchowy, co nie spowoduje zaburzeń w funkcjonowaniu ślimaka i wyniki EOAEs będą prawidłowe. W nielicznych przypadkach występuje kombinacja tych dwóch mechanizmów.

Metoda EOAE wydaje się przydatna w diagnostyce pacjentów, u których podejrzewa się symulacje ubytków słuchu [Musiek (i inni) 1994]. Test EOAE może być wykonany w sposób obiektywny bardzo szybko, a jego wynik może ukierunkować dalsze badania audiologiczne.

Wyniki szeregu badań wykazały, że stymulacja akustyczna ucha przeciwnego powoduje nieznaczne zmniejszenie poziomu SOAEs i EOAEs w badanym uchu [Collet (i inni) 1990; Puel, Rebillard 1990]. Odbywa się to za pośrednictwem systemu efferentnego środkowego, który wydaje się hamować funkcjonowanie mechanizmów aktywnych ślimaka w badanym uchu. Efekt ten jest jednak mały (rzędu 1 dB w odniesieniu do EOAEs) i charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem międzyosobniczym.

*

Wyniki dotychczasowych badań z dziedziny OAEs dostarczyły wielu nowych informacji dotyczących funkcjonowania układu słuchowego u człowieka. Potwierdziły one również przydatność otoemisji w warunkach klinicznych. Kontynuacja tych badań jest konieczna dla zebrania danych opartych na dużych populacjach pacjentów w różnych grupach wiekowych, co umożliwi opracowanie optymalnych parametrów testów CEOAEs i DPOAEs. Coraz więcej firm wkracza na rynki proponując nowe, szybkie systemy do pomiaru OAEs. W wielu ośrodkach testy oparte na metodzie otoemisji weszły już do codziennej praktyki w pracowniach audiologicznych. Wydaje się, że w niedalekiej przyszłości udoskonalone metody staną się jeszcze bardziej powszechne i będą stosowane rutynowo, dostarczając ważnych informacji przydatnych w diagnostyce układu słuchowego pacjentów.

Bibliografia

- Bilger R. C., Matthies M. L., Hammel D. R., Demorest M. E., 1990: Genetic implications of gender differences in the prevalence of spontaneous otoacoustic emissions. *J. Sp. Hear. Res.* 33, 418-432.
- Burns E. M., Arehart K. H., Campbell S. L., 1992: Prevalence of spontaneous otoacoustic emissions in neonates. *J. Acoust. Soc. Am.* 91, 1571-1575.
- Collet L., Kemp D. T., Veuillet E., Duclaux R., Moulin A., Morgon A., 1990: Effect of contralateral auditory stimuli on active cochlear micromechanical properties in human subjects. *Hear. Res.* 43, 251-262.
- Collet L., Veuillet E., Chanal J. M., Morgon A., 1991: Evoked otoacoustic emissions: Correlates between spectrum analysis and audiogram. *Audiology* 30, 164-172.
- Gorga M. P., Neely S. T., Bergman B., Beauchaine K. L., Kaminski J. R., Peters J. [et al.], 1993: Otoacoustic emissions from normal-hearing and hearing-impaired subjects: Distortion product responses. *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 2050-2060.
- Harris F. P., Probst R., Wenger R., 1991: Repeatability of transiently evoked otoacoustic emissions in normally hearing humans. *Audiology* 30, 135-141.
- Hauser R., 1995: Anwendung otoakustischer Emissionen: ein Kompendium für Klinik und Praxis, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.

- Hotz M. A., Harris F. P., Probst R., 1994: Otoacoustic emissions: An approach for monitoring aminoglycoside-induced ototoxicity. *Laryngoscope* 104, 1130-1134.
- Hotz M. A., Probst R., Harris F. P., Hauser R., 1993: Monitoring the effects of noise exposure using transiently evoked otoacoustic emissions. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)* 113, 478-482.
- Kemp D. T., 1978: Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1386-1391.
- Kok M. R., Zanten G. A. van, Brocaar M. P., Wallenburg H. C. S., 1993: Click-evoked oto-acoustic emissions in 1036 ears of healthy newborns. *Audiology* 32, 213-224.
- Lasky R., Perlman J., Hecox K., 1992: Distortion-product otoacoustic emissions in human newborns and adults. *Ear. Hear.* 13, 430-441.
- Lonsbury-Martin B. L., Cutler W. M., Martin G. K., 1991: Evidence for the influence of aging on distortion-product otoacoustic emissions in humans. *J. Acoust. Soc. Am.* 89, 1749-1759.
- Lonsbury-Martin B. L., Martin G. K., McCoy M. J., Whitehead M. L., 1994: Otoacoustic emissions testing in young children: Middle-ear influences. *Am. J. Otol.* 15 Suppl. 1, 13-20.
- Lonsbury-Martin B. L., Martin G. K., McCoy M. J., Whitehead M. L., 1995: New approaches to the evaluation of the auditory system and a current analysis of otoacoustic emissions. *Otolaryngol. Head. Neck. Surg.* 112, 50-63.
- Musiek F. E., Smurzynski J., Bornstein S. P., 1994: Otoacoustic emissions testing in adults: An overview. *Am. J. Otol.* 15 Suppl. 1, 21-28.
- Nelson D. A., Kimberly B. P., 1992: Distortion-product emissions and auditory sensitivity in human ears with normal hearing and cochlear hearing loss. *J. Speech. Hear. Res.* 35, 1142-1159.
- Norton S. J., 1994: Emerging role of evoked otoacoustic emissions in neonatal hearing screening. *Am. J. Otol.* 15 Suppl. 1, 4-12.
- Penner M. J., 1992: Linking spontaneous otoacoustic emissions and tinnitus. *Br. J. Audiol.* 26, 115-123.
- Plinkert P. K., Kröber S., 1991: Früherkennung einer Cisplatin-Ototoxizität durch evozierte otoakustische Emissionen. *Laryngo-rhino-otol.* 70, 457-462.
- Prieve B. A., Gorga M. P., Schmidt A., Nelly S., Peters J., Schultes L. [et al.], 1993: Analysis of transient-evoked otoacoustic emissions in normal-hearing and hearing-impaired ears. *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 3308-3319.
- Probst R., 1990: Otoacoustic emissions: An overview. *Adv. Otorhinolaryngol.* 44, 1-91.
- Puel J. L., Rebillard G., 1990: Effect of contralateral sound stimulation on the distortion product 2F₁-F₂: Evidence that the medial efferent system is involved. *J. Acoust. Soc. Am.* 87, 1630-1635.
- Roede J., Harris F. P., Probst R., Xu L., 1993: Repeatability of distortion product otoacoustic emissions in normally hearing humans. *Audiology*, 32, 273-281.
- Rossi G., Solero P., Rolando M., Olina M., 1991: Recovery time of the temporary threshold shift for delayed evoked otoacoustic emissions and tone bursts. *ORL* 53, 15-18.
- Smurzynski J., 1994: Longitudinal measurements of distortion-product and click-evoked otoacoustic emissions of preterm infants: Preliminary results. *Ear. Hear.* 15, 210-223.
- Smurzynski J., Jung M. D., Lafreniere D., Kim D. O., Kamath M. V., Rowe J. C. [et al.], 1993: Distortion-product and click-evoked otoacoustic emissions of preterm and full-term infants. *Ear. Hear.* 14, 258-274.
- Telisch F. F., Roth J., Stagner B. B., Lonsbury-Martin B. L., Balkany T. J., 1995a: Patterns of evoked otoacoustic emissions associated with acoustic neuromas. *Laryngoscope* 105, 675-682.
- Telisch F. F., Widick M. P., Lonsbury-Martin B. L., McCoy M. J., 1995b: Monitoring cochlear function intraoperatively using distortion product otoacoustic emissions. *Am. J. Otol.* 16, 597-608.
- White K. R., Behrens T. R. (ed.), 1993: The Rhode Island Hearing Assessment Project: Implications for universal newborn hearing screening. *Semin. Hear.* 14 (1).