

Rudolf Probst

Klinika Otolaryngologii Uniwersytetu w Bazylei, Szwajcaria

Agnieszka Jędrusik

Klinika Otolaryngologii Akademii Medycznej w Warszawie

Zastosowanie kliniczne otoemisji akustycznych

Clinical Applications of Otoacoustic Emissions

Słowa kluczowe: otoemisja akustyczna, zastosowanie kliniczne.

Key words: otoacoustic emission, clinical applications.

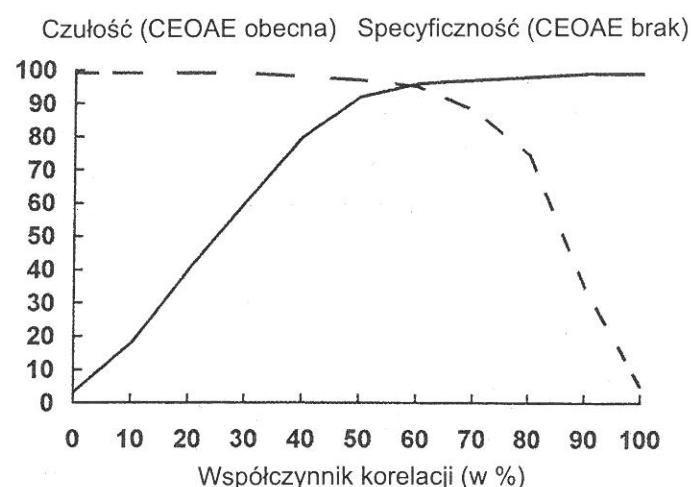
Streszczenie

Celem niniejszej pracy było przedstawienie wybranych zagadnień związanych z zastosowaniem klinicznym otoemisji akustycznych (OAEs – ang. *otoacoustic emissions*). W pracy omówiono zależność czułości i specyficzności testu od kryterium umożliwiającego stwierdzenie, czy w badanym uchu sygnał otoemisji jest rzeczywiście obecny. Omówiono również zagadnienie związku pomiędzy otoemisjami a progiem słyszenia. Przedstawiono najważniejsze zastosowania otoemisji, takie jak badania przesiewowe słuchu oraz monitorowanie funkcji ślimaka.

Summary

The aim of this paper was to summarise some of the foundations of the present clinical applications of otoacoustic emissions (OAEs) in everyday clinical audiology. Authors addressed their questions to the following problems, what parameters and values should be selected to decide if OAEs are present or absent and how those criteria influence the sensitivity and selectivity of this test. Second question is related to the associations of the pure-tone threshold to otoacoustic emissions, that seems to be not so straightforward as one would wish it to be. The use of OAEs in clinical audiology, such as screening of global peripheral function or monitoring of cochlear function is presented.

Chociaż otoemisje akustyczne zostały wykryte przez Davida Kempa [1978] 20 lat temu, to zastosowanie kliniczne [np. Lonsbury-Martin (i inni) 1991; Smurzyński, Probst 1996] tej metody stało się możliwe dopiero w ostatnich 10 latach dzięki rozwinięciu się produkcji aparatury do rejestracji sygnału otoemisji akustycznych (OAEs – ang. *otoacoustic emissions*). Mówiąc o zastosowaniu tej metody w praktyce klinicznej, należy zacząć od podstawowego pytania, na które nie ma wciąż jednoznacznej odpowiedzi. Nie chodzi w tym pytaniu wyłącznie o określenie zależności między progiem słyszenia a obecnością bądź brakiem otoemisji, ale raczej o próbę wskazania kryterium oceny sygnału, które pozwoli stwierdzić, iż rzeczywiście OAEs są obecne.



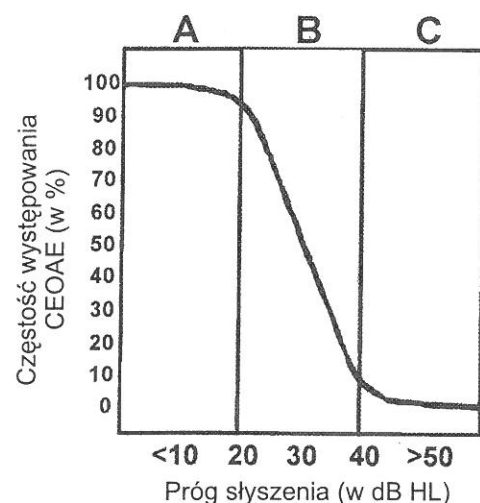
Ryc. 1. Wykres zależności czułości i specyficzności otoemisji wywołanej trzaskiem (CEOAEs – ang. *click evoked otoacoustic emissions*) od wartości współczynnika korelacji liniowej (linią przerywaną zaznaczono wykres czułości, a linią ciągłą – specyficzności)

Wykres na ryc. 1 ilustruje zmiany czułości i specyficzności metody w zależności od wartości współczynnika korelacji liniowej, który przyjęto za kryterium obecności otoemisji wywołanych trzaskiem (CEOAEs – ang. *click evoked otoacoustic emissions*). Współczynnik korelacji, który określa w tym przypadku stopień powtarzalności (ang. *reproducibility*) dwóch jednocześnie rejestrowanych przebiegów czasowych sygnału otoemisji, naniesiono na oś X. Analiza przedstawionych wykresów umożliwia uzyskanie odpowiedzi na pytanie: jaka wartość współczynnika korelacji pozwala na różnicowanie uszu generujących CEOAEs

i tych, w których sygnał ten nie powstaje? Podobnie jak to ma miejsce w przypadku innych testów klinicznych z uzyskaną odpowiedzią wiąże się określone prawdopodobieństwo właściwie postawionego rozpoznania. Linia ciągła na wykresie określa prawdopodobieństwo, przy którym dla określonej wartości współczynnika korelacji wszystkie uszy zaliczone są do grupy z obecnym sygnałem CEOAEs. Mniejsza wartość współczynnika korelacji oznacza, że z większym prawdopodobieństwem uszy generujące CEOAEs zaliczone są do tej grupy. Przy wartości współczynnika korelacji wynoszącym 0,2 praktycznie wszystkie uszy z CEOAEs zostaną włączone do tej grupy, dzięki czemu metoda staje się bardzo czuła. Jednocześnie do tej grupy zostanie zaliczonych wiele uszu, które nie generują otoemisji, co powoduje, że przy wartości współczynnika korelacji 0,2 metoda jest mało specyficzna. Przy wartości współczynnika korelacji 0,5 w dalszym ciągu niemal wszystkie uszy generujące CEOAEs zaliczane są do grupy z obecnym sygnałem CEOAEs, zatem czułość testu pozostaje nadal wysoka. Dopiero powyżej wartości 0,5 czułość metody wyraźnie się zmniejsza. Linia przerywana wyznacza skumulowane prawdopodobieństwo, przy którym dla pewnej wartości współczynnika korelacji uszy nie generujące CEOAEs zostaną zaliczone jako uszy bez sygnału CEOAEs. Wraz ze wzrostem wartości współczynnika korelacji rośnie prawdopodobieństwo, że wszystkie uszy nie generujące otoemisji zostaną odrzucone. Przy wartości współczynnika korelacji wynoszącej 0,8 odrzuconych zostanie prawie 100% uszu bez otoemisji, co oznacza, że przy tej wartości kryterium opartego na ocenie wartości współczynnika korelacji metoda jest wysoce specyficzna. Wiele uszu ze słabymi sygnałami otoemisji przy tej wartości kryterium zostanie zaliczonych do grupy bez CEOAEs, co sprawia, że metoda staje się mniej czuła. Należy zatem wybrać taką wartość współczynnika korelacji, przy której można uzyskać najbardziej optymalną czułość i specyficzność testu. Punkt, w którym przecinają się dwie krzywe (wartości czułości i specyficzności są takie same), odpowiada tej wartości. Wartość współczynnika korelacji liniowej wynosi w tym punkcie 0,6, a czułość i specyficzność metody ok. 95%. Oznacza to, że badane uszy zaliczamy do odpowiednich grup z prawdopodobieństwem 95%. Omawiane wyniki dotyczą wartości współczynnika korelacji wyznaczonego dla sygnału CEOAEs obejmującego cały badany zakres częstotliwości. Wartość współczynnika korelacji liniowej w poszczególnych pasmach oktawowych nie jest dokładnie określona, ale zasadniczo można przyjąć, że dla pasm 1 i 2 kHz wynosi ona ok. 0,8.

Kolejnym złożonym zagadnieniem jest próba określenia związku pomiędzy otoemisjami a progiem słyszenia wyznaczonym w audiometrii tonalnej. Na ryc. 2 przedstawiono schemat zależności pomiędzy średnim progiem słyszenia a częstotliwością występowania CEOAEs, opracowany na podstawie wyników wielu badań opublikowanych w literaturze. Kształt krzywej zasadniczo nie ulega zmianie, niezależnie czy analizie poddano szerokie czy wąskie pasmo częstotliwości sygnału

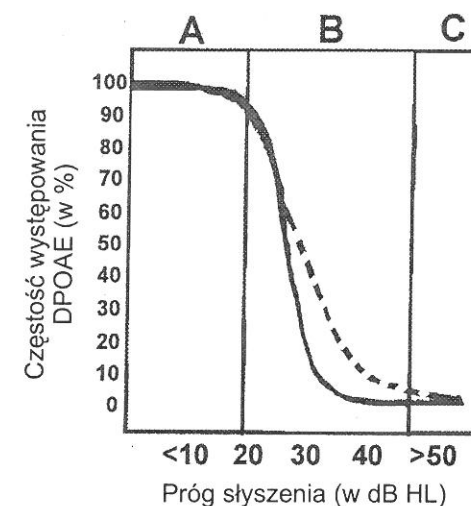
otoemisji [Bonfils, Betrand, Uziel 1988; Bonfils, Uziel, Pujol 1988; Bonfils (i inni) 1990; Probst 1987; Probst (i inni) 1991]. Próg słyszenia na poziomie 20 dB HL stanowi kryterium różnicujące uszy normalnie słyszące i te z uszkodzeniem słuchu. Powyżej tej wartości progu słyszenia częstość występowania CEOAEs zmniejsza się znacząco, a przy wartości progu słyszenia 40 dB HL sygnał CEOAEs rejestrowany jest bardzo rzadko. Na rysunku zaznaczono trzy strefy: A, B i C. W strefie A znajdują się uszy, dla których próg słyszenia jest mniejszy niż 20 dB HL, a sygnały CEOAEs w 99% są obecne. W strefie C, w której próg słyszenia przekracza 40 dB HL, sygnały CEOAEs nie są rejestrowane. Strefa B, zwana



Ryc. 2. Wykres zależności pomiędzy średnim progiem słyszenia a częstością występowania CEOAEs

„strefą niepewności”, obejmuje te przypadki, których próg słyszenia zawiera się w granicach 20-40 dB HL. Dla wartości progu słyszenia 30 dB HL częstość występowania CEOAEs wynosi 50%. Można zatem powiedzieć, że sygnały CEOAEs są obecne, jeśli próg słyszenia jest nie większy niż 30 dB HL, a nie występują w uszach, w których wartość progu słyszenia przekracza 30 dB HL (zasada „30 dB”). Wydaje się jednak, że zagadnienie to jest bardziej złożone. Zdarza się bowiem, że w niektórych przypadkach otoemisje wywołane trzaskiem są obecne pomimo tego, że próg słyszenia wynosi 35 dB HL, natomiast w innych przypadkach stwierdza się brak sygnału CEOAEs przy wartości progu słyszenia wynoszącym 25 dB HL. Stromość krzywej w strefie B oraz położenie punktów rozgraniczających strefy A i C zależą w pewnym stopniu od parametrów testu i metody analizy wyników.

Na ryc. 3 przedstawiono podobny wykres ilustrujący zależność pomiędzy częstością występowania DPOAEs a progiem słyszenia dla częstotliwości tonu pierwotnego f_2 lub średniej geometrycznej częstotliwości tonów pierwotnych f_0 [Bonfils, Avan 1992; Gorga (i inni) 1993; Harris 1990; Hauser, Probst 1990; Smurzyński, Kim 1992]. Szerokość strefy A jest identyczna jak w przypadku CEOAEs (ryc. 2), natomiast istotne różnice obserwuje się w odniesieniu do strefy B. Odpowiedzi DPOAEs wywołane bodźcami o wysokiej intensywności – wykres zaznaczony linią przerywaną – charakteryzują się większą amplitudą, są częściej rejestrowane. Dlatego wykres ten ma mniej stromy przebieg niż wykres zaznaczony linią ciągłą – dla odpowiedzi wywołanych bodźcami o mniejszej intensywności. Jeśli próg słyszenia jest mniejszy niż 25 dB HL, odpowiedzi są z reguły obecne dla większości częstotliwości audiometrycznych (w zakresie 1-6 kHz). Strefa B, zwana też „strefą niepewności”, jest szersza dla DPOAEs wywołanych bodźcami o większej intensywności niż dla CEOAEs. Oznacza ona, iż specyficzność DPOAEs oceniana w odniesieniu do progu słyszenia zmniejsza się dla bodźców o większej intensywności. W przeciwieństwie do testu CEOAEs dla otoemisji produktów zniekształceń nieliniowych ślimaka nie można sformułować prostej zasady „30 dB”. Sygnały DPOAEs są obecne w uszach, w których próg słyszenia wynosi nawet 60 dB HL. Z drugiej strony sygnały te nie są rejestrowane przy wartości progu słyszenia nie przekraczającym 25 dB HL. Położenie punktów oddzielających strefy A, B, i C oraz stopień nachylenia krzywej zależą w znacznie większym stopniu od parametrów testu DPOAEs niż w przypadku testu CEOAEs.



Ryc. 3. Wykres zależności pomiędzy częstością występowania DPOAEs a progiem słyszenia dla bodźców o wysokiej intensywności (linia przerywana) i niskiej intensywności (linia ciągła)

Podsumowując można zatem powiedzieć, że związek między progiem słyszenia wyznaczonym w audiometrii tonalnej a wielkością sygnału otoemisji nie jest tak bezpośredni, jak można by tego oczekiwać. Wydaje się, że niezależnie od parametrów metody nie można na podstawie wyników rejestracji DPOAEs w sposób bezpośredni zrekonstruować audiogramu.

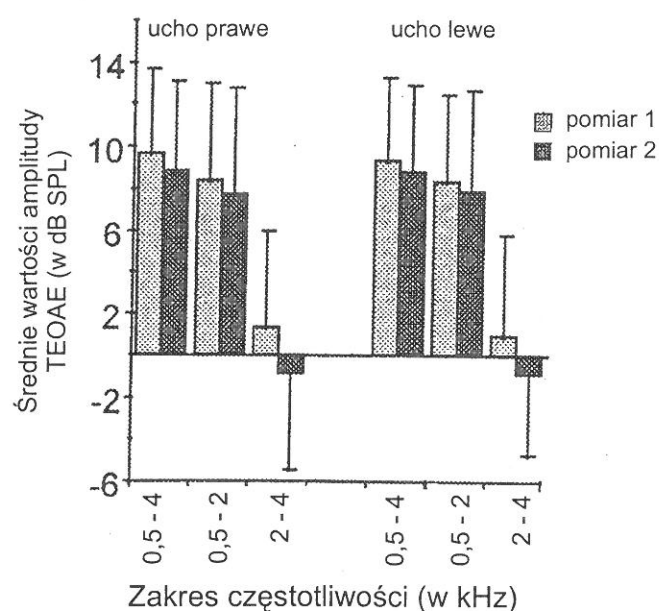
Zarówno audiometria tonalna, jak i badanie sygnału OAEs stanowią źródło informacji na temat funkcji ślimaka. Nie należy jednak zapominać o zasadniczych różnicach istniejących między tymi dwoma metodami. Sygnały CEOAEs są wywoływane krótkim bodźcem o czasie trwania kilku milisekund, natomiast w audiometrii tonalnej stosowane są bodźce dłuższe – o czasie trwania pół sekundy lub dłuższym. Oba rodzaje bodźców różnią się także zakresem poziomów stymulacji oraz charakterystyką częstotliwościową. Sygnały CEOAEs są zwykle mierzone przy zastosowaniu trzasku szerokopasmowego oraz intensywności 40-50 dB powyżej progu słyszenia, co prowadzi do powstania innego wzorca pobudzenia ślimaka, znacznie szerszego, niż ma to miejsce w przypadku audiometrii tonalnej, w której stosuje się bodziec tonalny. Podobny problem dotyczy rejestracji DPOAEs, w których ślimak pobudzany jest jednocześnie dwoma bodźcami o intensywności 20-50 dB powyżej progu słyszenia. Sygnały CEOAEs i DPOAEs stanowią odpowiedź związaną ze zjawiskami mechanicznymi zachodzącymi w prawidłowo funkcjonującym ślimaku, natomiast w audiometrii tonalnej badana jest odpowiedź o charakterze behawioralnym. Ze względu na te zasadnicze różnice nie można oczekiwać prostej zależności między tymi dwoma badaniami.

Pojawia się zatem pytanie, czy różnice, które występują między audiometrią tonalną a otoemisjami akustycznymi, sprawiają, że rejestracje OAEs są mniej cennym badaniem niż audiometria progowa? Wydaje się, że tak nie jest. Mają one pewną wartość kliniczną i poznawczą, ponieważ dostarczają nieosiągalnych w inny sposób informacji o stanie ślimaka. Z tego punktu widzenia wydaje się, że porównywanie otoemisji do progu słyszenia nie jest najistotniejsze, odwraca bowiem uwagę od innych, być może ważniejszych cech otoemisji. Jest to badanie szybkie, proste, obiektywne i może stanowić źródło dodatkowych informacji uzupełniających m.in. wynik audiometrii tonalnej czy słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu. Informacja ta jest szczególnie istotna w diagnostyce różnicowej ośrodkowych i psychogennych zaburzeń słuchu. Jednakże należy pamiętać, że badania otoemisji pozwalają ocenić obwodową część narządu słuchu w sposób ogólny, dlatego zaburzenia funkcji ucha środkowego mogą prowadzić do uzyskiwania wyników wskazujących na uszkodzenie ślimaka, choć w rzeczywistości jego funkcje są prawidłowe. Należy również podkreślić, że wykonywanie badania otoemisji ma sens w przypadkach niedosłuchów małego i średniego stopnia bez komponentu przewodzeniowego.

Do innych zastosowań otoemisji należą badania przesiewowe obwodowej części narządu słuchu oraz monitorowanie funkcji ślimaka. Badania przesiewowe stanowią najbardziej klasyczne zastosowanie otoemisji. W założeniu metody te powinny charakteryzować się wysoką czułością i specyficznością. Jeśli parametry techniczne rejestracji (np. możliwość zastosowania techniki ciągów maksymalnej długości – MLS – ang. *maximum length sequence*) lub wprowadzenie wysoce zautomatyzowanych urządzeń dających tylko wynik „tak – nie” sprawiają, że metoda jest szybka, prosta i tania, to z punktu widzenia badań przesiewowych można zaakceptować nieco niższą specyficzność testu. Wykres na ryc. 2 wyjaśnia, dlaczego rejestracje CEOAEs są wysoce użyteczne w badaniach przesiewowych słuchu. Normalnie słyszące osoby, należące do strefy A, są wyraźnie oddzielone od strefy C, do której zaliczone są osoby z zaburzeniami funkcji ślimaka. Te dwie strefy są oddzielone od siebie stosunkowo wąską strefą B z wyrazistym przejściem od grupy normy do patologii. Żaden inny test przesiewowy słuchu nie charakteryzuje się taką „ostrością” różnicowania. Nie można jednak zapomnieć, że w przypadku otoemisji pod określeniem „patologia” kryją się zaburzenia funkcji ślimaka, a nie ubytek słuchu, ponieważ w pewnych przypadkach ślimak funkcjonuje prawidłowo, natomiast uszkodzenie znajduje się na wyższych piętrach drogi słuchowej. Dlatego zaburzenia zlokalizowane poza ślimakiem, w ośrodkowej części narządu słuchu, nie są wykrywane przy użyciu tego testu.

Zaawansowane badania na zwierzętach wykazały, że otoemisje stanowią odpowiednie narzędzie do monitorowania funkcji ślimaka przez fakt, iż są metodą obiektywną, czułą i niezbyt czasochłonną. Podczas krótkotrwałego monitorowania (od kilku minut do godzin) sonda umieszczona w przewodzie słuchowym zewnętrznym nie zmienia pozycji, co umożliwia uzyskanie odpowiedzi charakteryzujących się wysoką powtarzalnością. Metoda ta pozwala na monitorowanie zmian poziomu amplitudy sygnału rzędu 1 dB. Typowymi przykładami zastosowań są badania chorych z czasowym przesunięciem progu słyszenia wywołanym ekspozycją na hałas i zmiany progu słyszenia po podaniu gliceryny u chorych z chorobą Meniere’a. Mały rozrzut śródosobniczy sygnałów CEOAEs i DPOAEs sprawia, że badania te są przydatne w monitorowaniu funkcji ślimaka w długich okresach czasu – dni i tygodni. Dlatego znajdują one zastosowanie kliniczne w ocenie stanu ślimaka u osób narażonych na działanie hałasu lub przyjmujących leki ototoksyczne.

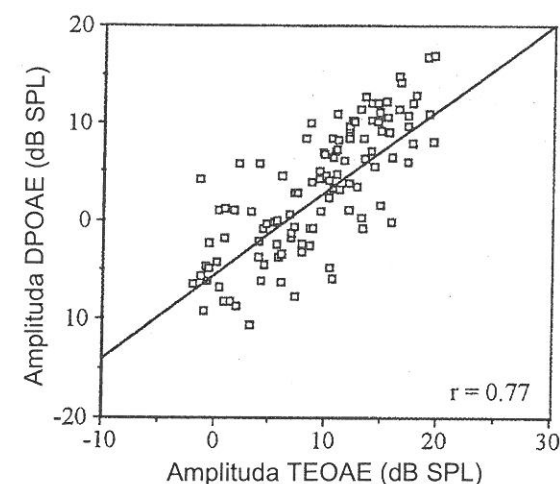
Na ryc. 4 przedstawiono wyniki rejestracji monitorowania funkcji ślimaka za pomocą CEOAEs u żołnierzy po ekspozycji na hałas wystrzału pocisku. Białe kolumny przedstawiają wyniki pomiarów wykonanych przed, a czarne po ekspozycji na hałas. Wartość amplitudy wszystkich odpowiedzi rejestrowanych po ekspozycji była statystycznie niższa w zakresie częstotliwości 2-4 kHz. Redukcja amplitudy sygnału wynosiła 84% po stronie prawej i 90% po stronie lewej. Mniej



Ryc. 4. Wyniki rejestracji monitorowania funkcji ślimaka za pomocą TEOAEs u żołnierzy po ekspozycji na hałas wystrzału pocisku

dokładnie określona jest wartość kliniczna monitorowania długoterminowego (trwającego kilka lat) w odniesieniu do zaburzeń funkcji ślimaka wywołanych np. starzeniem się narządu słuchu czy długoletnim działaniem czynników uszkadzających słuch, takich jak hałas. Pomimo że nie ma zgodności wśród badaczy i klinicystów, który test – CEOAEs czy DPOAEs – jest bardziej przydatnym narzędziem klinicznym, należy pamiętać, iż oba umożliwiają ocenę zjawisk nieliniowych zachodzących w ślimaku. Wiele wskazuje na to, że te same mechanizmy odpowiedzialne są za generowanie obu rodzajów otoemisji. Różnice dotyczą procedur rejestracji i form prezentacji wyników.

Na ryc. 5 przedstawiono zależność między badaniem DPOAEs a TEOAEs [Probst, Harris 1993]. Wyniki pomiarów TEOAEs i DPOAEs są bardzo silnie skorelowane, wskazując, że podobieństwa obu form otoemisji są prawdopodobnie ważniejsze niż istniejące między nimi różnice. Dlatego w praktyce należy stosować taką formę rejestracji otoemisji, przy której w określonej sytuacji klinicznej można najszybciej i w sposób najbardziej wiarygodny dokonać pomiaru. Wybór metody zależy od wielu czynników, takich jak cel badania, dostępność systemu pomiarowego lub stopień wyszkolenia personelu wykonującego rejestrację. Wiele wskazuje na to, że w przyszłości postęp technologii zbliży te dwie formy otoemisji.



Ryc. 5. Wykres korelacji pomiędzy wynikami DPOAEs a TEOAEs

Jest pewne, że dalszy rozwój tych metod uczyni badania otoemisji, zarówno CEOAEs jak i DPOAEs, bardziej skutecznym narzędziem diagnostycznym. Można wyrażać nadzieję, że badanie OAEs będzie z powodzeniem szerzej wprowadzane do praktyki audiologicznej.

Bibliografia

- Bonfils P., Avan P., 1992: Distortion-product otoacoustic emission: Values for clinical use. „Arch. Otolaryngol. Head and Neck Surg.” 118, 1069-1076.
- Bonfils P., Avan P., Francois M., Marie P., Trotoux J., Narcy P., 1990: Clinical significance of otoacoustic emissions: A perspective. „Ear Hear.” 11, 155-158.
- Bonfils P., Bertrand Y., Uziel A., 1988: Evoked otoacoustic emissions: Normative data and presbycusis. „Audiology” 27, 27-35.
- Bonfils P., Uziel A., Pujol R., 1988: Evoked oto-acoustic emissions from adults and infants: Clinical applications. „Acta Otolaryngol.” 105, 445-449.
- Gorga M.P., Neely S. T., Bergman B., Beauchaine K. L., Kaminski J.R., Peters J., Jesteadt W., 1993: Otoacoustic emissions from normal-hearing and hearing-impaired subjects: Distortion product responses. „J. Acoust. Soc. Am.” 93, 2050-2060.
- Harris F. P., 1990: Distortion-product otoacoustic emissions in humans with high frequency sensorineural hearing loss. „J. Speech. Hear. Res.” 33, 594-600.
- Hauser R., Probst R., 1990: The influence of systematic primary-tone level variation L2-L1 on the acoustic distortion product emissions 2f1-f2 in normal human ear. „J. Acoust. Soc. Am.” 89, 280-286.
- Kemp D. T., 1978: Stimulated acoustic emissions from the human auditory system. „J. Acoust. Soc. Am.” 64, 1386-1391.

- Lonsbury-Martin B. L., Whitehead M. L., Martin G. K., 1991: Clinical applications of otoacoustic emissions. „J. Speech. Hear. Res.” 34, 964-981.
- Probst R., Harris F. P., 1993: A comparison of transiently evoked and distortion-product otoacoustic emissions in humans. W: J. H. J. Allum, D. J. Allum-Mecklenburg, F. P. Harris, R. Probst (Eds.). Progress in brain research. Vol. 97, Amsterdam: Elsevier Science, 91-99.
- Probst R., Lonsbury-Martin B. L., Martin G. K., 1991: A review of otoacoustic emissions. „J. Acoust. Soc. Am.” 89, 2027-2067.
- Probst R., Lonsbury-Martin B. L., Martin G. K., Coats A. C., 1987: Otoacoustic emissions in ears with hearing loss. „Am. J. Otolaryngol.” 8, 73-81.
- Smurzyński J., Kim D. O., 1992: Distortion-product and click-evoked otoacoustic emissions of normally-hearing adults. „Hear. Res.” 58, 227-240.
- Smurzyński J., Probst R., 1996: Otoacoustic emissions. Technical aspects and clinical applications. „Central and East European Journal of Oto-Rhino-Laryngology and Head and Neck Surgery” 1, 3, 192-204.