

Krzysztof Kochanek<sup>1,2</sup>, Henryk Skarżyński<sup>2</sup>,  
Ewa Orkan-Łęcka<sup>1</sup>, Adam Pilka<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Katedra i Klinika Otolaryngologii, Akademia Medyczna, Warszawa

<sup>2</sup> Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

**Porównanie odpowiedzi pnia mózgu dla krótkich tonów  
o takich samych wartościach czasów narastania  
i opadania, ale różnych widmach u osób  
z wysokoczęstotliwościowymi ubytkami słuchu**

**A comparison of auditory brainstem responses elicited by tone pips with the  
same rise/fall times but different acoustic spectrum in subjects with high-fre-  
quency hearing loss**

**Słowa kluczowe:** słuchowe potencjały wywołane pnia mózgu, krótkie tony, obwiednie nieliniowe.  
**Key words:** auditory brainstem responses, tone pips, nonlinear envelopes.

**Streszczenie**

Wielu autorów sugeruje, że wprowadzenie w krótkich tonach obwiedni nieliniowych w miejsce stosowanych powszechnie obwiedni liniowych może zwiększyć specyficzność częstotliwościową słuchowych potencjałów wywoływanych pnia mózgu. Jednakże niektórzy badacze stosują te bodźce z włączeniem w obwiednię odcinka plateau, co powoduje znaczne poszerzenie widma akustycznego bodźca w porównaniu z bodźcem bez odcinka plateau. Można zatem oczekiwać, że skutkiem rozmycia widma bodźca zwiększy się stymulowany obszar ślimaka, co może prowadzić do zmniejszenia specyficzności częstotliwościowej odpowiedzi.

W celu zweryfikowania tej hipotezy w niniejszej pracy wykonano badania w grupie 14 osób z bardzo stromymi, wysokoczęstotliwościowymi ubytkami słuchu, w których porównano parametry odpowiedzi ABR rejestrowane dla dwóch rodzajów krótkich tonów o częstotliwości 4 kHz obwiedni nieliniowej Gaussa – jednego bez oraz drugiego z odcinkiem plateau. Wartości czasów narastania i opadania wynosiły 1 ms, natomiast odcinka plateau – 0,25 ms.

Przeprowadzone badania wykazały, że wartości progu fali V odpowiedzi wywoływanych bodźcem z odcinkiem plateau są niższe o 15-25 dB w odniesieniu do progu odpowiedzi rejestrowanych dla bodźca bez plateau. Oznacza to, że poszerzenie widma, spowodowane wprowadzeniem odcinka plateau do obwiedni bodźca, zmniejsza specyficzność częstotliwościową odpowiedzi.

### Summary

It has been suggested that the use of nonlinear envelopes (e.g., Blackman or Gaussian) may improve frequency specificity of auditory brainstem responses (ABRs) elicited by tone pips. However, nonlinear envelopes have been often used for stimuli with a plateau in the mid-part. Spectra of these stimuli are more complex and broader than those without plateau. The spectral splatter in tone pips with plateau results in broadening the region of the basilar membrane eliciting the response. The aim of the study was to compare ABRs elicited by tone pips with and without plateau in subjects with a steeply sloping (60-70 dB/oct) high-frequency hearing loss. Two types of 4 kHz tone-pips were digitally synthesized using a Gaussian envelope with the rise/fall time of 1 ms: (1) with no plateau and (2) with plateau of one cycle (0.25 ms). The ABR thresholds of wave V were determined in 10 and 5 dB steps. The ABR data recorded with the two types of tone pips were divergent. The differences between ABR thresholds for the two stimuli were 15-25 dB and the thresholds of wave V of ABRs elicited by the tone pips without plateau were better correlated with the audiometric thresholds at 4 kHz than those obtained for the tone pips with plateau. The results suggest that embodying the plateau part in tone pips with a nonlinear envelope may weaken frequency specificity of ABRs due to energy spread to frequency bands adjacent to the signal frequency and therefore eliciting a broader region of the cochlea. Thus, the spectrum of tone pips has a significant effect on the differences between audiometric and ABR thresholds in ears with a steeply sloping high-frequency hearing loss.

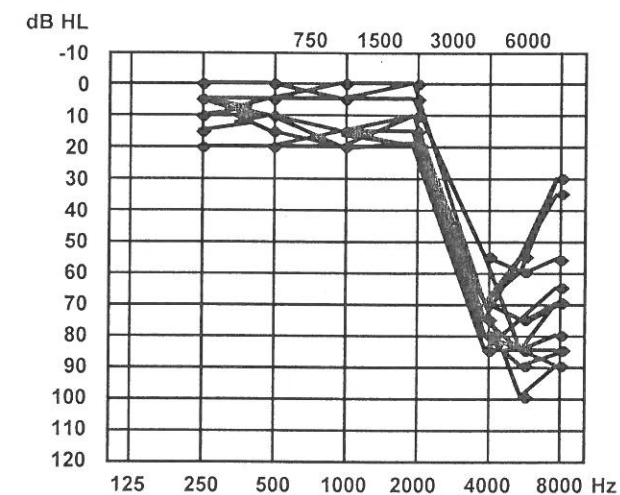
W celu poprawy specyficzności częstotliwościowej słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu (ABR) wielu badaczy stosuje krótkie tony o obwiedniach nieliniowych, np. w kształcie krzywej Gaussa lub Blackmana, zamiast tonów o obwiedniach liniowych [Gorga (i in.) 1988; Stapells (i in.) 1990; Hoke (i in.) 1991; Robier (i in.) 1992; Oates, Stapells 1997a, b; Sininger (i in.) 1997]. Przy zachowaniu takich samych wartości parametrów czasowych obu bodźców widmo bodźca o obwiedni nieliniowej jest znacznie węższe niż bodźców o obwiedni liniowej. W związku z tym zakłada się, że odpowiedzi pnia mózgu wywoływane tymi bodźcami będą pochodziły z węższego obszaru błony podstawnej ślimaka i będą bardziej specyficzne częstotliwościowo.

Część badaczy, wychodząc z założenia, że odpowiedzi ABR należą do kategorii odpowiedzi typu *onset*, a więc powstających w fazie włączania bodźca, stosuje bodźce o obwiedniach nieliniowych z odcinkiem plateau, uważając, że nie powinno to mieć większego znaczenia dla specyficzności częstotliwościowej odpowiedzi [Fuxe (i in.) 1993; Gorga (i in.) 1988; Sininger (i in.) 1997]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wprowadzenie tego odcinka do obwiedni powoduje, że w widmie pojawiają się listki boczne, które zwiększają jego szerokość, co może mieć znaczenie dla specyficzności częstotliwościowej odpowiedzi [Gorga, Thornton 1989].

W celu oceny wpływu zmiany szerokości widma krótkiego tonu na parametry odpowiedzi pnia mózgu w niniejszej pracy wykonano badania dla dwóch bodźców o obwiedni nieliniowej – jednego z plateau i drugiego bez plateau. Oba bodźce miały takie same wartości czasów narastania i opadania. Postawiono hipotezę, że jeżeli nie tylko czas narastania, ale również widmo bodźca jest istotne w procesie kreowania odpowiedzi typu *onset*, to odpowiedzi dla obu bodźców powinny się różnić między sobą. Jeżeli hipoteza ta jest słuszna, to można oczekiwać, że bodziec o szerszym widmie mocy będzie pobudzał większy obszar błony podstawnej, co powinno prowadzić do spadku specyficzności częstotliwościowej odpowiedzi, w porównaniu z odpowiedziami dla bodźca o wąskim widmie mocy.

### I. MATERIAŁ I METODA

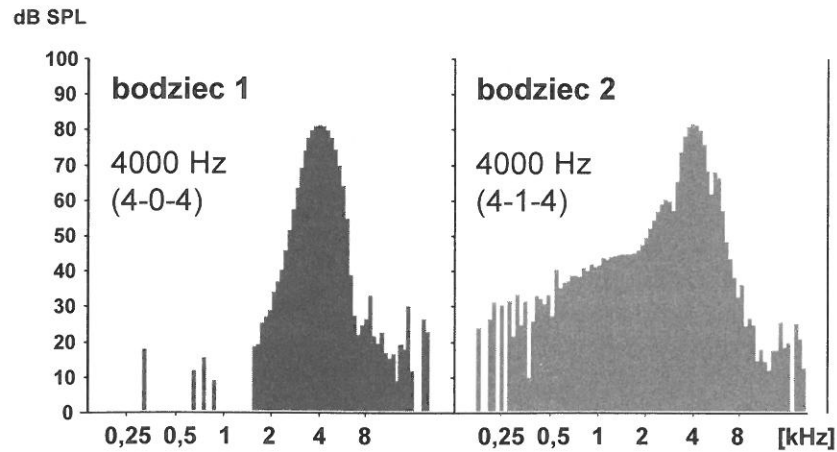
Badania wykonano w grupie 14 osób dorosłych w wieku od 25 do 45 lat z wysokoczęstotliwościowymi ubytkami słuchu typu ślimakowego o dużej stopniowości. W zakresie częstotliwości od 250 do 2000 Hz czułość słuchu badanych osób nie przekraczała 20 dB HL, natomiast dla wyższych częstotliwości występowały duże spadki czułości słuchu o nachyleniu do 70 dB/okt. Maksymalne wartości ubytków słuchu występowały dla 4 lub 6 kHz. Na ryc. 1 przedstawiono indywidualne audiogramy uszu objętych badaniami.



Ryc. 1. Indywidualne audiogramy osób z wysokoczęstotliwościowymi ubytkami słuchu typu ślimakowego

Oba bodźce stosowane w niniejszej pracy miały tę samą częstotliwość (wynoszącą 4000 Hz) oraz identyczne wartości czasów narastania i opadania

o wartości 1 ms. W jednym z bodźców wprowadzono odcinek plateau o wartości 0,25 ms. Odpowiedzi rejestrowano za pomocą polskiego systemu do badań elektrofizjologicznych słuchu o nazwie Eptest z czasem analizy wynoszącym 20 ms. Pasma wzmacniacza biologicznego wynosiło od 200 do 2000 Hz. Bodźce prezentowano przez słuchawki nauszne TDH-49 firmy Telephonics z częstotliwością powtarzania 31/s. W odpowiedziach wyznaczano próg oraz latencję fali V. W analizie statystycznej różnic pomiędzy progami i latencjami fali V stosowano test t-Studenta dla prób powiązanych z poziomem istotności  $p < 0,05$ .



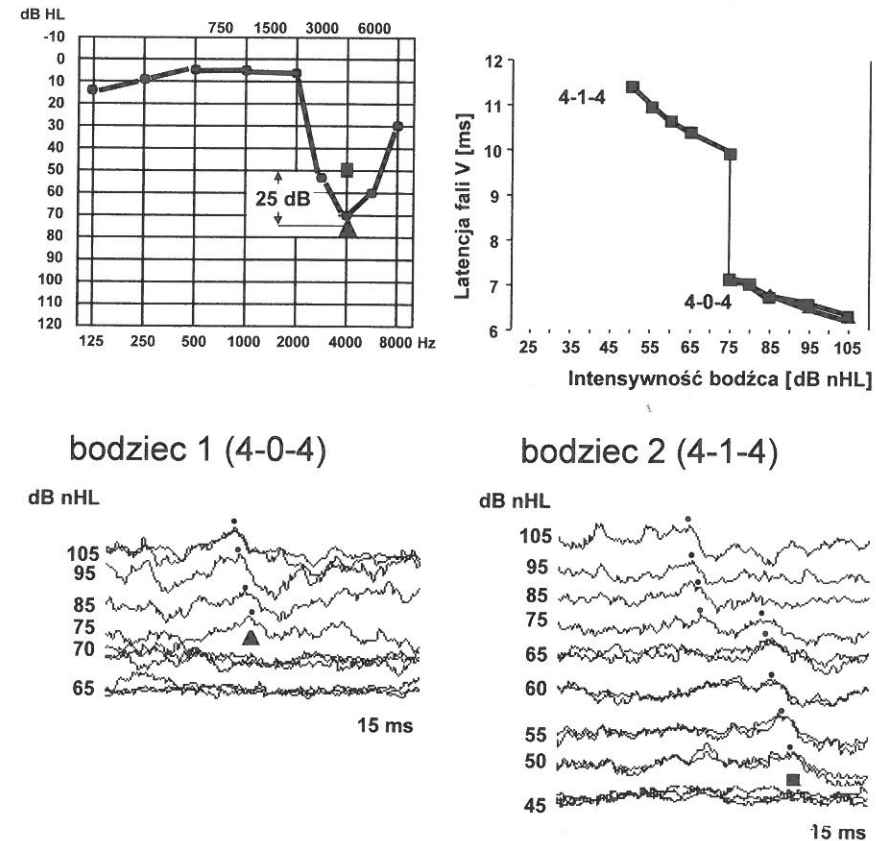
Ryc. 2. Widma akustyczne bodźców

Na ryc. 2 przedstawiono widma mocy obu bodźców, które zmierzono za pomocą zestawu firmy Brüel & Kjaer, składającego się ze sztucznego ucha 4152, mikrofonu pomiarowego 4190 oraz analizatora widmowego 2145. W analizie stosowano 512 uśrednień. Różnice w cechach widm są ewidentne. Energia bodźca 1 skupiona jest w znacznym stopniu wokół częstotliwości, natomiast widmo bodźca 2 z odcinkiem plateau jest znacznie szersze.

## II. WYNIKI

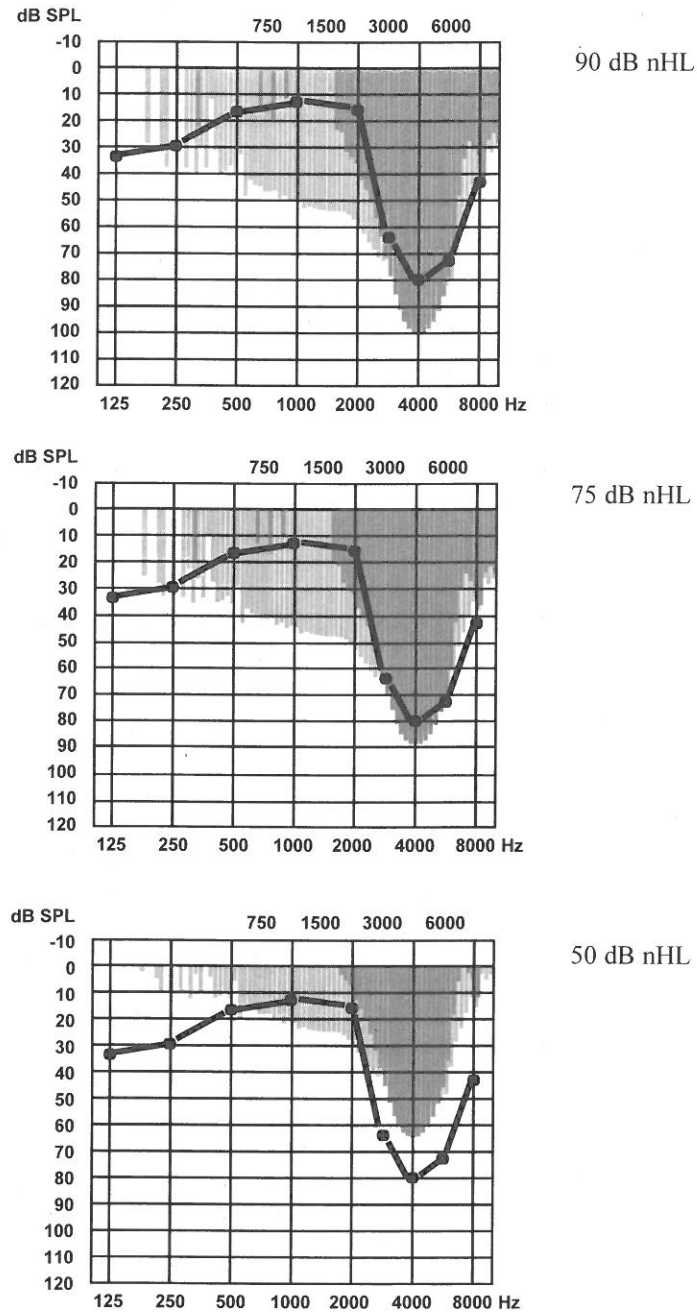
Na ryc. 3 przedstawiono audiogram oraz odpowiedzi pnia mózgu dla dwóch rodzajów bodźców wraz z wyznaczonym wykresem funkcji latencja–natężenie fali V osoby z wysokoczęstotliwościowym ubytkiem słuchu. Odpowiedzi dla obu bodźców charakteryzują się różnymi progami oraz latencjami fali V. Próg dla bodźca wąskopasmowego wynosi 75 dB nHL i jest wyższy o 25 dB od progu dla bodźca z plateau. Latencja fali V dla obu bodźców, dla intensywności od 75 do 105 dB nHL jest praktycznie taka sama. Dla intensywności niższych latencja fali V

odpowiedzi dla bodźca 2 wzrosła w sposób skokowy. Warto zwrócić uwagę na fakt, że w odpowiedziach dla bodźca 2 – szerokopasmowego, przy intensywności 75 dB nHL widoczne są dwie fale V, przy czym ich latencje znacznie się różnią, co może wskazywać na jednoczesne pobudzenie odległych od siebie rejonów ślimaka.



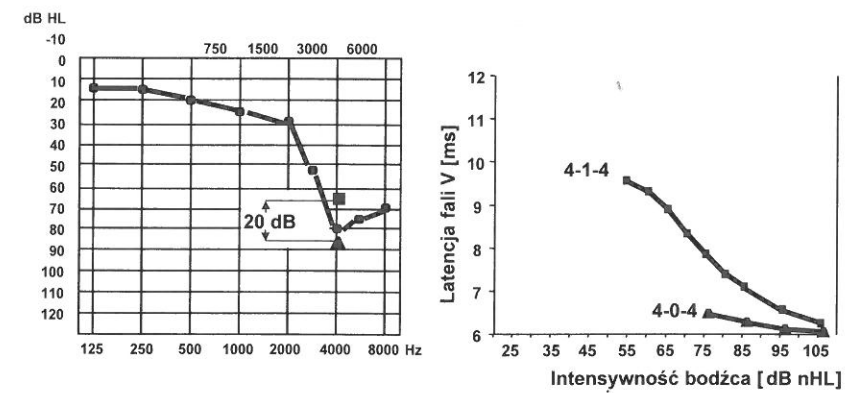
Ryc. 3. Przykład rejestracji ABR, wraz z audiogramem i wyznaczonym wykresem funkcji latencja–natężenie dla fali V

W celu umożliwienia oceny relacji pomiędzy widmem bodźca i audiogramem dla różnych intensywności dokonano operacji odbicia obu widm względem osi X i nałożono je na audiogram (z ryc. 3), który został wyskalowany dla celów porównawczych w jednostkach dB SPL. Dla intensywności 90 dB nHL energia obu bodźców wykracza poza próg słyszenia w rejonie największego ubytku słuchu, przy czym dla bodźca 2 również w rejonie średnich i niskich częstotliwości. Identyczne i zarazem krótkie latencje fali V dla obu bodźców wskazują, że odpowiedź pochodzi z tego samego rejonu wysokich częstotliwości. W przypadku bodźca 2 energia bodźca zawarta w listkach bocznych dla średnich i niskich częstotliwości



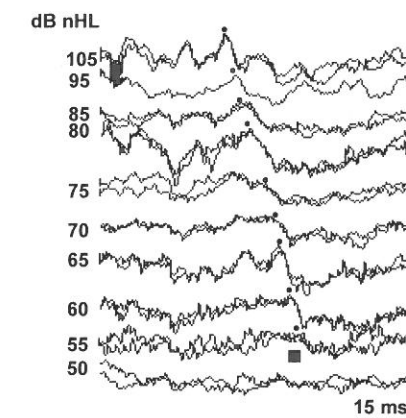
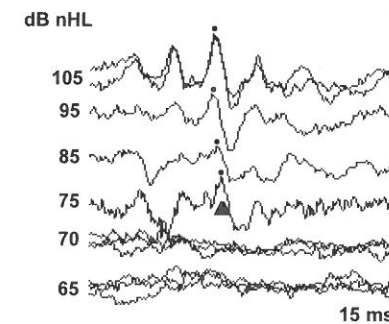
Ryc. 4. Relacje pomiędzy widmem bodźca oraz audiogramem osoby, której wyniki badań zostały przedstawione na ryc. 3, dla różnych intensywności bodźca – 90, 75 i 50 dB nHL

nie wywołała mierzalnej odpowiedzi, o czym świadczy fakt braku różnicy latencji pomiędzy odpowiedziami. Dla intensywności, przy której wyznaczono próg fali V dla bodźca 1 (75 dB nHL) tylko niewielka część energii tego bodźca przekraczała wartość progu słyszenia. Natomiast energia bodźca 2, przy tej samej intensywności, przekraczała w znacznym stopniu wartość progu słyszenia w zakresie niskich i średnich częstotliwości oraz w mniejszym stopniu dla częstotliwości z rejonu największego ubytku słuchu. Stąd w zapisie odpowiedzi dla bodźca 2 pojawiły się dwie fale V (ryc. 3) o znacznie różniących się latencjach, co świadczy o jednoczesnym pobudzeniu oddalonych od siebie rejonów ślimaka. Dla intensywności 50 dB nHL, przy której wyznaczono próg fali V dla bodźca 2, energia obu bodźców w rejonie największego ubytku jest podprogowa, natomiast w rejonie średnich i niskich częstotliwości nadprogowa jest energia bodźca 2. Jest ona na tyle duża, że jest w stanie wywołać mierzalną odpowiedź o bardzo długiej latencji, co potwierdza, że miejscem generacji odpowiedzi jest ten rejon częstotliwości.



bodziec 1 (4-0-4)

bodziec 2 (4-1-4)

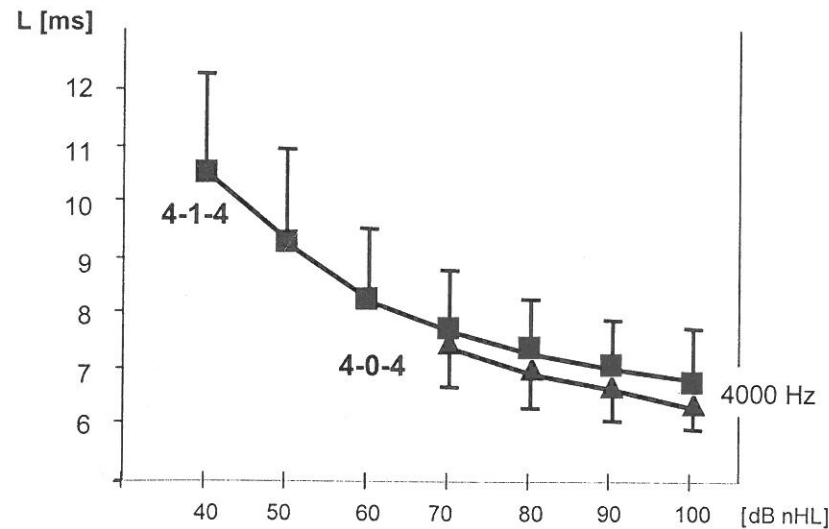


Ryc. 5. Przykład wyników badań osoby z wysokoczęstotliwościowym ubytkiem słuchu

U niektórych osób zmiany latencji były monotoniczne, tak jak w przykładzie prezentowanym na ryc. 5. Jednak również w tym przypadku latencja odpowiedzi dla bodźca 2 znacznie się zwiększała po przekroczeniu progu odpowiedzi bodźca 1. W odróżnieniu od wyników przedstawionych na ryc. 4 latencje obu odpowiedzi różniły się również w rejonie wysokich częstotliwości. Oznacza to, że w tym przypadku odpowiedź dla bodźca 2 w rejonie największych intensywności pochodzi z rejonu niższych częstotliwości niż dla bodźca 1. Różnica progów fali V w prezentowanym przykładzie wynosiła 20 dB.

Tab. 1. Średnie wartości oraz odchylenie standardowe progu słyszenia dla częstotliwości 4000 Hz (AUD), progów fali V dla obu bodźców (ABR S1 i ABR S2) oraz różnic pomiędzy progami

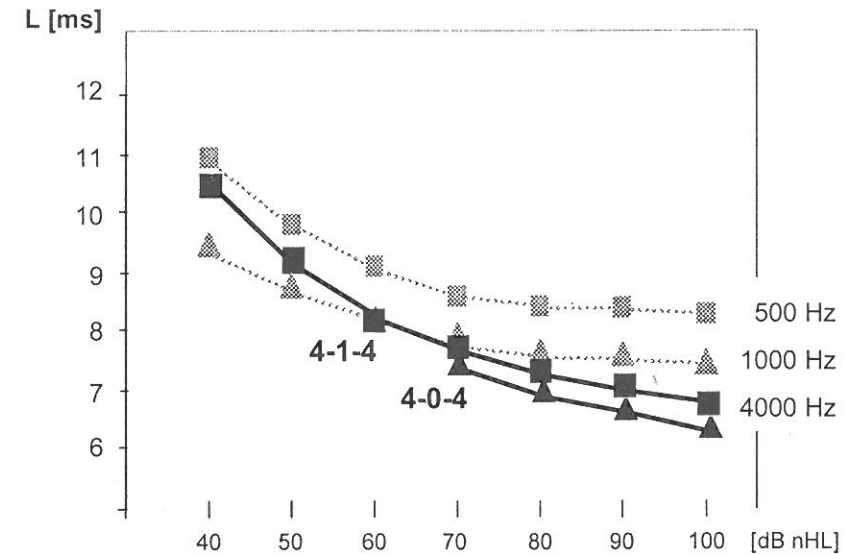
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Zakres
AUD [dB HL]	73,5	10,7	55 ÷ 85
ABR S1 [dB HL]	67,7	7,0	60 ÷ 85
ABR S2 [dB HL]	45,8	10,3	35 ÷ 70
ABR S1 – AUD [dB]	-5,8	10,4	-20 ÷ 5
ABR S2 – AUD [dB]	-27,8	12,0	-45 ÷ 0
ABR S1 – ABR S2 [dB]	21,9	3,8	15 ÷ 25



Rys. 6. Średnie wykresy funkcji latencja-natężenie fali V dla dwóch bodźców o częstotliwości 4000 Hz

W całym materiale zakres różnic progów fali V dla obu bodźców zawierał się w granicach od 15 do 25 dB, przy czym wyższe wartości progów uzyskano dla bodźca wąskopasmowego.

Na ryc. 6 przedstawiono średnie wartości latencji fali V dla obu bodźców w funkcji intensywności. W zakresie wysokich intensywności od 70 do 100 dB nHL nieznacznie dłuższe są latencje odpowiedzi dla bodźca szerokopasmowego, przy czym różnice te nie są istotne statystycznie. Dla niższych intensywności latencja fali V odpowiedzi dla bodźca szerokopasmowego znacznie wzrastała.



Ryc. 7. Porównanie średnich wykresów funkcji latencja-natężenie fali V osób z wysokoczęstotliwościowymi ubytkami słuchu wyznaczonych dla bodźców o różnych częstotliwościach

W celu stwierdzenia, z jakich rejonów ślimaka pochodziły odpowiedzi dla obu bodźców przy różnych intensywnościach, porównano wykresy funkcji latencja-natężenie otrzymane w niniejszej pracy z wykresami dla bodźców o częstotliwościach 500 i 1000 Hz, uzyskanych również u osób z ubytkami wysokoczęstotliwościowymi. Dane te pochodzą z pracy Kochanka [2000]. Z porównania przedstawionych wykresów wynika, że dla 100 dB nHL latencje dla poszczególnych bodźców różnią się między sobą, przy czym dłuższe latencje występują dla bodźców o niższych częstotliwościach. W pobliżu progu odpowiedzi dla bodźca 1 (bez plateau) latencja fali V jest zbliżona do latencji odpowiedzi dla bodźca o częstotliwości 1000 Hz, natomiast odpowiedzi progowe dla bodźca 2 mają latencje zbliżoną do latencji odpowiedzi dla bodźca o częstotliwości 500 Hz.

### III. DYSKUSJA

Wyniki uzyskane w niniejszej pracy jednoznacznie wskazują, że widmo krótkiego tonu ma istotne znaczenie dla parametrów uzyskiwanych odpowiedzi. Z uwagi na fakt, że oba bodźce stosowane w niniejszej pracy miały takie same wartości czasu narastania i opadania, różnice w parametrach odpowiedzi można w bezpośredni sposób wiązać z różnicami w widmach mocy. Zatem pomimo faktu, że odpowiedzi ABR są zaliczane do kategorii odpowiedzi typu *onset* [Kodera (i in.) 1983; Gerull (i in.) 1987], dla których najważniejszym parametrem decydującym o cechach odpowiedzi jest czas narastania bodźca, widmo bodźca ma również znaczenie, szczególnie w przypadkach, gdy występują duże spadki czułości słuchu. Jak wykazano w niniejszej pracy, w sytuacjach gdy energia bodźca zawarta w głównym prążku widma jest podprogowa, o cechach odpowiedzi decyduje energia listków bocznych.

Odpowiedzi uzyskiwane dla bodźca wąskopasmowego cechują się znaczną specyficnością częstotliwościową, o czym świadczy zarówno próg odpowiedzi dobrze skorelowany z audiometrycznym progami słyszenia, jak i wartość latencji fali V, która była mniejsza niż latencja odpowiedzi dla bodźca szerokopasmowego. Wprowadzenie do obwiedni odcinka plateau spowodowało wzrost szerokości widma i pobudzenie ślimaka w znacznie szerszym zakresie, w tym również dla średnich i niskich częstotliwości, gdzie czułość słuchu była w granicach normy. W efekcie szerszego pobudzenia ślimaka nastąpiło zmniejszenie progu odpowiedzi i znaczny wzrost latencji fali V. Porównanie widma odpowiedzi z audiogramem przy różnych intensywnościach bodźca oraz wzrost latencji fali V wskazuje, że w sytuacji, gdy energia zawarta w głównym prążku widma jest podprogowa, odpowiedź jest wywoływana przez energię bodźca zawartą w listkach bocznych widma, jeżeli jest nadprogowa. Odpowiedź ta z uwagi na znacznie niższy próg fali V zaniża wielkość szacowanego ubytku słuchu dla częstotliwości 4000 Hz. Oznacza to, że specyficność częstotliwościowa odpowiedzi dla bodźca z plateau jest znacznie mniejsza niż odpowiedzi otrzymywanych dla bodźca bez plateau.

Stwierdzone różnice w parametrach odpowiedzi dla obu bodźców, przy zachowaniu takich samych wartości czasów narastania bodźców, wskazują jednoznacznie, że są one wynikiem różnic w widmach obu bodźców. Oznacza to, że nie jest zatem obojętne dla parametrów odpowiedzi pnia mózgu wywoływanych bodźcem o obwiedni nieliniowej, czy bodziec jest generowany z plateau, czy też bez tego odcinka. Jeżeli chcemy zwiększyć specyficność częstotliwościową odpowiedzi poprzez zastosowanie krótkich tonów o obwiedni nieliniowej, to nie mogą one zawierać odcinka plateau. W przeciwnym przypadku wzrost szerokości widma związany z pojawieniem się listków bocznych może doprowadzić do znacznego spadku specyficności częstotliwościowej odpowiedzi, szczególnie w przypadkach dużych spadków czułości słuchu.

### IV. WNIOSKI

1. Wprowadzenie odcinka plateau do bodźca o częstotliwości 4000 Hz o obwiedni Gaussa zmniejsza specyficność częstotliwościową odpowiedzi pnia mózgu w uszach ze stromymi ubytkami słuchu w zakresie wysokich częstotliwości.

2. Widmo krótkiego tonu ma istotne znaczenie dla parametrów słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu.

### Bibliografia

- Foxe J. J., Stapells D. R. [1993]. Normal infant and adult auditory brainstem responses to bone-conducted tones. „Audiology” 32, 95-109.
- Gerull G., Mrowiński D., Jansen T., Anft D. [1987]. Auditory brainstem responses to single-slope stimuli. „Scand. Audiol.” 16, 227-235.
- Gorga M. P., Kaminski J. R., Beauchaine K. A., Jesteadt W. [1988]. Auditory brainstem responses to tone bursts in normally hearing subjects. „J. Speech Hear. Res.” 31, 87-97.
- Gorga M., Thornton A. [1989]. The choice of stimuli for ABR measurements. „Ear Hear.” 10, 217-230.
- Hoke M., Pantev C., Ansa L., Ltkenhner B., Herrmann E. [1991]: A time saving BERA technique for frequency-specific assessment of the auditory threshold through tone-pulse series stimulation (TOPSTIM) with simultaneous gliding high-pass noise masking (GHINOMA). „Acta Otolaryngol. Suppl. (Stockh.)” 482, 45-56.
- Kochanek K. [2000]. Ocena progu słyszenia za pomocą słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu w zakresie częstotliwości 500-4000 Hz. Praca habilitacyjna. Akademia Medyczna, Warszawa, 72-73.
- Kodera K., Marsh R., Suzuki M., Suzuki J. [1983]. Portions of tone pips contributing to frequency-selective auditory brain stem responses. „Audiology” 22, 209-218.
- Oates P., Stapells D. R. [1997a]. Frequency specificity of the human auditory brainstem and middle latency responses to brief tones. I. High-pass noise masking. „J. Acoust. Soc. Am.” 102, 3597-3608.
- Oates P., Stapells D. R. [1997b]: Frequency specificity of the human auditory brainstem and middle latency responses to brief tones. II. Derived response analyses. „J. Acoust. Soc. Am.” 102, 3609-3619.
- Robier T., Fabry D., Leek M., Summers W. [1992]. Improving the frequency specificity of the auditory brain stem response. „Ear Hear.” 13, 4, 223-227.
- Sininger Y. S., Abdala C., Cone-Wesson B. [1997]. Auditory threshold sensitivity of the human neonate as measured by the auditory brainstem response. „Hear. Res.” 104, 27-38.
- Stapells D. R., Picton T. W., Durieux-Smith A., Edwards C. G., Moran L. M. [1990]. Thresholds for short-latency auditory-evoked potentials to tones in notched noise in normal-hearing and hearing-impaired subjects. „Audiology” 29, 262-274.