

Krzysztof Kochanek

Klinika Otolaryngologii Akademii Medycznej w Warszawie
Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

Przyczyny błędów w progowych badaniach ABR

Errors in Thresholds Evaluation of ABR

Słowa kluczowe: słuchowe potencjały wywołane pnia mózgu, próg, błędy.
Key words: auditory brainstem responses, threshold, errors.

Streszczenie

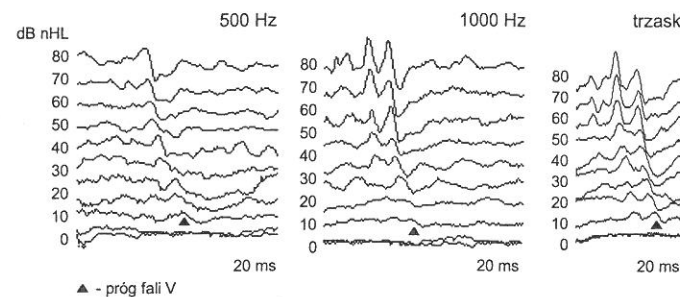
W pracy omówiono najczęstsze przyczyny błędów progowych badań ABR wynikających z nieprzestrzegania w praktyce klinicznej określonych procedur badań oraz z braku dostatecznej wiedzy dotyczącej różnych czynników mających wpływ na jakość odpowiedzi oraz na interpretację wyników.

Summary

In this study the most common errors in auditory threshold estimation using auditory brainstem responses are presented.

Ocena progu słyszenia za pomocą rejestracji słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu (ABR) jest obecnie standardową, obiektywną metodą oceny czułości słuchu w zakresie częstotliwości 500-4000 Hz. Badania te są stosowane we wszystkich przypadkach, w których nie jest możliwe wykonanie wiarygodnego badania behawioralnego lub badania audiometrycznego. W szczególności badania te są przydatne w obiektywnych badaniach progu słyszenia u małych dzieci.

Badanie progu słyszenia za pomocą słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu polega na zarejestrowaniu zestawu odpowiedzi dla bodźców o różnych intensywnościach procedurą szeregu natężeniowego i określeniu progu fali V, czyli najniższej intensywności bodźca, przy której fala ta jest jeszcze obecna w zapisie odpowiedzi. W praktyce klinicznej próg fali V traktuje się jako równorzędny wartości progu słyszenia wyznaczonemu w badaniu audiometrycznym. Badania te wykonuje się najczęściej dla bodźca typu „trzask” oraz dla krótkich impulsów tonalnych o różnych częstotliwościach, zazwyczaj 500 i 1000 Hz.



Ryc. 1. Przykład odpowiedzi ABR zarejestrowanych dla trzasku oraz krótkich impulsów sinusoidalnych o częstotliwościach 500 i 1000 Hz u osoby o słuchu normalnym

Na ryc. 1 przedstawiono przykład rejestracji odpowiedzi dla trzasku oraz krótkich impulsów sinusoidalnych o częstotliwościach 500 i 1000 Hz. Można zauważyć, że odpowiedzi dla trzasku i impulsów tonalnych znacznie różnią się między sobą. W odpowiedziach dla bodźców tonalnych dłuższe są latencje poszczególnych fal oraz inna jest morfologia zapisu. W pobliżu progu w odpowiedziach dla 500 i 1000 Hz fala V jest „szersza” (bardziej „rozmyta”) niż fala V w odpowiedziach dla trzasku. Jest to przede wszystkim efekt znacznej różnicy w szybkości narastania fali ciśnienia akustycznego dla trzasku i bodźców tonalnych, szczególnie przy niskich intensywnościach bodźca oraz na skutek różnego stopnia synchronizacji odpowiedzi nerwu słuchowego dla bodźców o różnych częstotliwościach.

W przykładzie przedstawionym na ryc. 1 odpowiedzi charakteryzują się wysoką jakością, dlatego oznaczenie progu fali V jest dość proste. Dla wszystkich odpowiedzi próg fali V wynosi 10 dB nHL. Jeżeli badanie przeprowadzone jest we właściwy sposób, to błąd oznaczenia progu słyszenia na podstawie progu fali V nie przekracza zazwyczaj 10 dB. Większe błędy pojawiają się wówczas, gdy zarejestrowane odpowiedzi mają niską jakość, spowodowaną obecnością artefaktów

mięśniowych, oraz gdy podczas rejestracji lub analizy odpowiedzi popełniane są błędy wynikające z nieprzestrzegania w praktyce pewnych zasad oraz standardowych procedur badań. Może zatem dojść do sytuacji, które niestety nie są zbyt rzadkie w praktyce klinicznej, że wyniki badań progowych ABR przeprowadzonych w różnych ośrodkach audiologicznych będą znacznie się między sobą różnić.

W niniejszej pracy zostaną omówione źródła typowych błędów progowych badań ABR spotykanych w praktyce klinicznej.

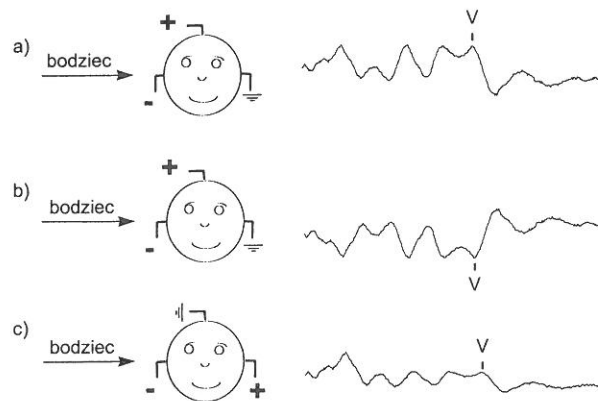
Zasadnicze źródła błędów popełnianych podczas progowego badania ABR:

- 1) niewłaściwa lokalizacja elektrod,
- 2) niewłaściwa impedancja elektrod,
- 3) niewłaściwa czułość wzmacniacza,
- 4) niewłaściwy czas analizy,
- 5) zbyt mała liczba uśrednień,
- 6) brak maskowania ucha przeciwnego przy dużej różnicy czułości słuchu w obu uszach,
- 7) niewłaściwa skala amplitudowa i czasowa zapisu na ekranie urządzenia,
- 8) zbyt wczesne zakończenie badania,
- 9) niewłaściwa interpretacja zapisu przy oznaczaniu fali V.

I. NIEWŁAŚCIWA LOKALIZACJA ELEKTROD

Na ryc. 2 przedstawiono zapisy odpowiedzi ABR zarejestrowane przy prawidłowym podłączeniu elektrod pomiarowych do przedwzmacniacza (a) oraz zarejestrowane przy zamianie elektrody dodatniej z ujemną (b) i elektrody dodatniej z uziemiającą (c). Jeżeli rutynowo stosowany jest sposób podłączenia elektrod przedstawiony na ryc. 2 a, to zamiana podłączenia elektrod dodatniej z ujemną powoduje odwrócenie zapisu. Szczyty fal: I, III i V skierowane są w tym przypadku ku dołowi. Osoby mniej doświadczone, które nie zwrócą uwagi na wartości latencji, mogą błędnie interpretować cały zapis odpowiedzi, ale zasadniczo nie powinno to mieć wpływu na oznaczenie progu odpowiedzi. Znacznie niebezpieczniejsza jest zamiana elektrod dodatniej z uziemiającą. W tym przypadku powstaje zapis odpowiedzi z elektrod podłączonych pomiędzy dwoma wyrostkami sutkowymi, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia amplitudy fali I, ale jednocześnie do obniżenia amplitudy fali V. Spadek amplitudy fali V prowadzi do obniżenia wartości współczynnika określającego iloraz amplitud sygnału i szumu –

S/N dla wszystkich poziomów stymulacji, co z kolei powoduje spadek jakości odpowiedzi w pobliżu jej progu. Skutkiem wystąpienia tego błędu może być podwyższenie progu odpowiedzi o 20 dB.



Ryc. 2. Zapisy odpowiedzi ABR zarejestrowane przy różnych podłączeniach elektrod (a – poprawne podłączenie elektrod, b – zamienione elektrody dodatnia i ujemna, c – zamienione elektrody dodatnia z uziemiającą)

II. NIEWŁAŚCIWA IMPEDANCJA ELEKTROD

W badaniach elektrofizjologicznych powinno się przestrzegać zasady, aby impedancje przejścia: skóra – elektroda były dla wszystkich elektrod zbliżone oraz aby ich wartość na przykład w przypadku rejestracji potencjałów słuchowych pnia mózgu nie przekraczała 4 k Ω . Jeżeli impedancje poszczególnych elektrod znacznie różnią się między sobą (szczególnie elektrody dodatniej i ujemnej), to rozsymetryzuje się wejście wzmacniacza biologicznego, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia wartości współczynnika tłumienia sygnału wspólnego. Praca wzmacniacza jest w tym przypadku niewłaściwa, a tłumienie sygnałów zakłócających, np. artefaktów sieciowych, jest znacznie mniejsze. Ostatecznie sytuacja ta prowadzi do spadku jakości sygnału i trudności przy ocenie progu odpowiedzi. Podobnie jak w poprzednim przypadku, błąd oceny progu odpowiedzi na skutek niewłaściwej impedancji elektrod może wynieść ok. 20 dB.

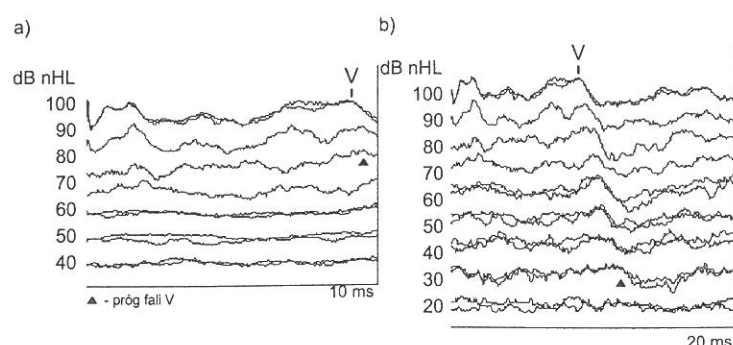
III. NIEWŁAŚCIWA CZUŁOŚĆ WZMACNIACZA

Czułość wzmacniacza nie powinna być dobierana w sposób przypadkowy lub dowolny. Przy ustalaniu wzmocnienia należy kierować się zasadą, aby z jednej strony nie przekraczać dopuszczalnego zakresu pracy przetwornika analogowo-cyfrowego, a z drugiej strony aby wzmocnienie nie było zbyt niskie, gdyż nie w pełni będzie wykorzystany zakres przetwarzania przetwornika. Jeżeli wzmocnienie jest zbyt niskie, przetwornik analogowo-cyfrowy, np. 12-bitowy, będzie pracował jako przetwornik 8-bitowy. W tym przypadku nastąpi pozorny spadek rozdzielczości przetwornika oraz spadek jakości odpowiedzi w całym zakresie intensywności bodźca, co w konsekwencji może prowadzić do powstawania błędów w ocenie progu odpowiedzi.

IV. NIEWŁAŚCIWY CZAS ANALIZY

Dla osób o słuchu normalnym oraz z zaburzeniami słuchu typu ślimakowego latencja fali V dla bodźca typu „trzask” nawet w pobliżu progu odpowiedzi nie przekracza 10 ms. Jeżeli jednak rejestracje wykonywane są u osób z ubytkami słuchu typu mieszanego lub z zaburzeniami przewodnictwa w nerwie słuchowym lub pniu mózgu, latencja fali V dla trzasku może wynosić w pobliżu progu ponad 10 ms. Dla bodźców tonalnych 500 i 1000 Hz nawet w uszach normalnych latencja fali V w pobliżu progu wynosi ok. 14 ms. Dlatego w badaniach progowych ABR powinno stosować się czas analizy wynoszący 20 ms.

Na ryc. 3 przedstawiono przykład zapisów odpowiedzi ABR dla trzasku u osoby z zaburzeniem przewodnictwa w nerwie słuchowym i pniu mózgu, zarejestrowanych w czasie analizy 10 i 20 ms. Przykład ten w wymowny sposób pokazuje, w jaki sposób niewłaściwie dobrany czas analizy może prowadzić do powstania dużego błędu przy ocenie progu fali V. Na skutek zaburzeń słuchu typu pozaślimakowego latencja fali V jest bardzo zmieniona i wynosi dla bodźca o intensywności 100 dB nHL ok. 9 ms. Próg fali V dla odpowiedzi zarejestrowanych w czasie analizy 10 ms wynosi 80 dB nHL, natomiast w czasie analizy 20 ms – 30 dB nHL. Zatem błąd oznaczenia progu fali V na skutek niewłaściwego czasu analizy wynosi w przedstawionym przykładzie 50 dB.



Ryc. 3. Przykład rejestracji odpowiedzi ABR u osoby z zaburzeniem słuchu typu pozaślimakowego, wykonanych z czasem analizy 10 i 20 ms

V. ZBYT MAŁA LICZBA UŚREDNIEŃ

Jakość rejestracji ABR zależy od wielu różnych czynników, m.in. od poziomu artefaktów mięśniowych oraz od wielkości amplitudy odpowiedzi. Zasadniczym celem procesu uśredniania pojedynczych odpowiedzi jest zwiększenie ilorazu amplitud fali V i szumu, który określa się w praktyce wartością współczynnika S/N. Jeżeli liczba uśrednień jest niewielka, to wartość współczynnika S/N jest mała, a jakość odpowiedzi bardzo niska. W skrajnym przypadku może się zdarzyć, że artefakty będą interpretowane jako fala V, co może prowadzić do bardzo dużych błędów w ocenie progu odpowiedzi, przekraczających 50 dB. Dlatego dla odpowiedzi okołoprogowych liczba uśrednień powinna wynosić przynajmniej 1000, a ponadto rejestracje powinny być powtarzane przynajmniej dwukrotnie.

VI. BRAK MASKOWANIA UCHA PRZECIWNEGO PRZY DUŻEJ RÓŻNICY CZUŁOŚCI SŁUCHU W OBU USZACH

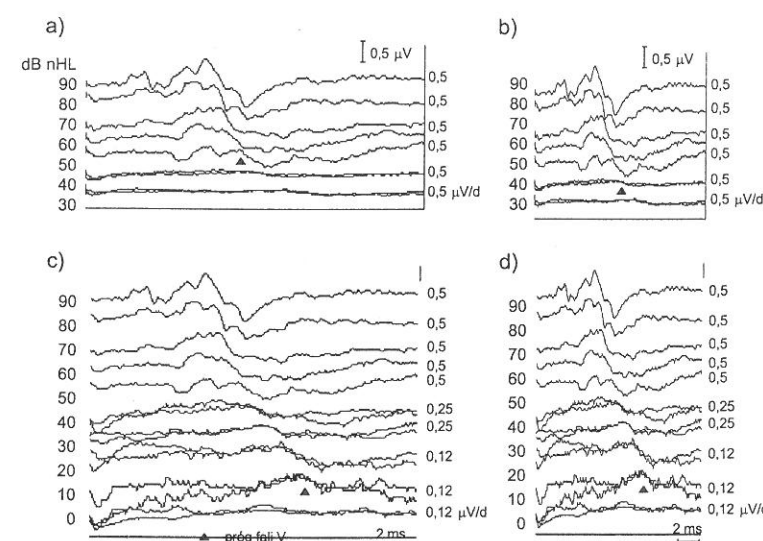
Pomimo że problem maskowania ucha przeciwnego nie jest w takim samym stopniu krytyczny, jak w progowych badaniach audiometrycznych, to jednak należy mieć na uwadze fakt, iż przy znacznej różnicy czułości słuchu w obu uszach (powyżej 60 dB) istnieje duże prawdopodobieństwo, że podczas rejestracji odpowiedzi ABR dla najwyższych intensywności bodźca w uchu o bardzo dużym ubytku słuchu będzie pobudzane również ucho przeciwne, skutkiem czego rejestrowane będą odpowiedzi kontralateralne z ucha o mniejszym ubytku słuchu, które mylnie mogą być interpretowane jako odpowiedzi ipsilateralne ucha z bardzo

głębokim ubytkiem słuchu. Jeżeli opisana sytuacja dotyczy osoby z jednostronną całkowitą głuchotą, to błąd oceny progu słyszenia może wynieść 40 dB.

VII. NIEWŁAŚCIWA SKALA AMPLITUDOWA I CZASOWA ZAPISU NA EKRANIE URZĄDZENIA

Błędy w badaniach progowych ABR mogą wystąpić nie tylko na etapie rejestracji odpowiedzi, ale również przy ich interpretacji. W nowoczesnych urządzeniach do badań elektrofizjologicznych słuchu istnieje możliwość zmiany skali czasowej i amplitudowej zarejestrowanych przebiegów, co może z jednej strony znacznie ułatwić interpretację wyników, ale z drugiej strony może prowadzić do istotnych błędów w ocenie progu fali V.

Na ryc. 4 przedstawiono ten sam zestaw odpowiedzi dla trzasku osoby normalnie słyszącej w różnych skalach czasowych i amplitudowych. Czas analizy odpowiedzi wynosił 20 ms. Próg fali V oznaczony w zestawie 4a wynosi 50 dB nHL. W zestawie 4b, który różni się od zestawu 4a jedynie skalą czasową, można zauważyć, że fala V jest prawdopodobnie obecna również w odpowiedzi dla bodźca o intensywności 40 dB nHL. Gdy w odpowiedziach dla 40 i 30 dB nHL zwiększono dwukrotnie czułość zapisu na ekranie urządzenia, okazało się, że fala V jest obecna nie tylko dla bodźca o intensywności 40 dB, ale również dla 30 dB nHL. Ostatecznie próg fali V oznaczony w zestawie 4c wynosił 10 dB nHL.



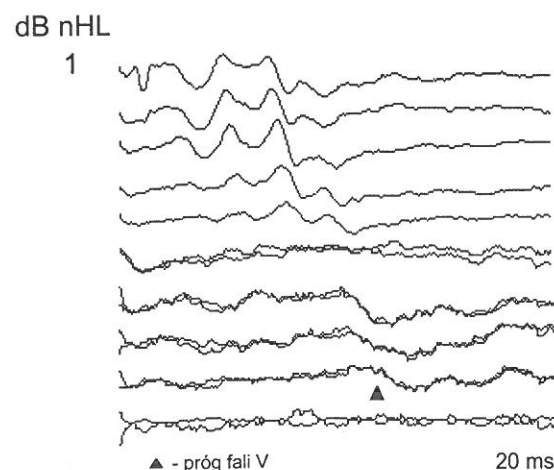
Ryc. 4. Wpływ skali amplitudowej i czasowej na oznaczenie progu odpowiedzi ABR

Na ryc. 4d zestaw z rys. 4c przedstawiono w skali czasowej o połowę mniejszej. Można zauważyć, że zabieg ten znacznie ułatwia analizę progu odpowiedzi. W przedstawionych przykładach błąd oznaczenia progu fali V na skutek niewłaściwie dobranej skali amplitudowej i czasowej zarejestrowanych przebiegów wynosił 40 dB.

VIII. ZBYT WCZESNE ZAKOŃCZENIE BADANIA

Duże błędy w badaniach progowych ABR mogą również wystąpić wówczas, gdy zbyt wcześnie zakończy się badanie. Sytuacja ta dotyczy w szczególności badań progowych dla bodźców o częstotliwościach 500 i 1000 Hz. Na ryc. 5 przedstawiono przykład odpowiedzi dla 500 Hz zarejestrowany u osoby normalnie słyszającej. Pomimo że próg fali V wynosi 20 dB nHL, należy zwrócić uwagę, że fala V jest praktycznie niewidoczna w odpowiedziach dla bodźca o intensywności 50 dB nHL. Gdyby badanie zakończono na tym poziomie, próg fali V wynosiłby 60 dB nHL, a błąd oznaczenia progu – 40 dB.

W zarejestrowanym zestawie odpowiedzi można wyróżnić dwa ciągi – jeden w zakresie intensywności od 100 do 60 dB nHL i drugi w zakresie od 40 do 20 dB nHL. Odpowiedź dla bodźca o intensywności 50 dB nHL znajduje się zatem pomiędzy tymi ciągami.



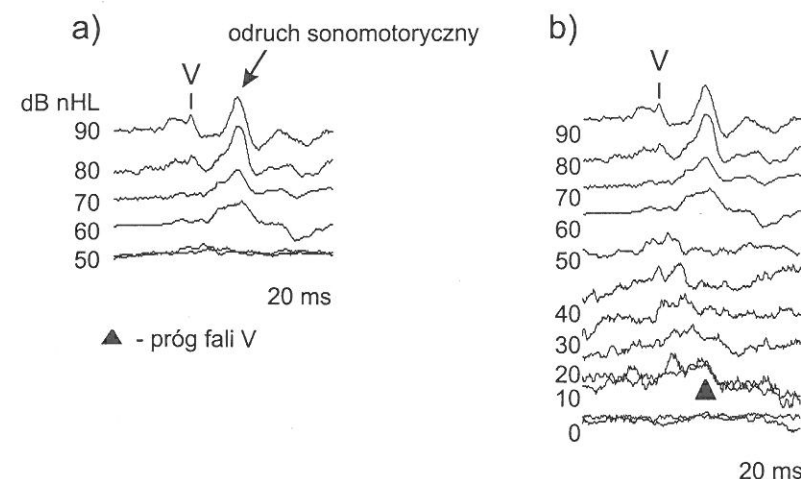
Ryc. 5. Przykład odpowiedzi ABR dla bodźca o częstotliwości 500 Hz, zarejestrowanych u osoby o słuchu normalnym

Powodem takiego zachowania się odpowiedzi dla bodźca o częstotliwości 500 Hz jest gwałtowna zmiana miejsca pobudzenia ślimaka przy zmianie intensywności bodźca z 60 do 40 dB nHL. Dla intensywności z zakresu od 100 do

60 dB nHL odpowiedź jest generowana głównie w zakręcie podstawnym ślimaka, pomimo że częstotliwość nominalna bodźca wynosi 500 Hz, natomiast dla intensywności z zakresu od 40 do 20 dB nHL zmienia się wzorzec pobudzenia ślimaka i odpowiedzi pochodzą głównie z zakrętu szczytowego. Dla poziomu 50 dB nHL odpowiedzi są generowane zarówno w zakręcie podstawnym, jak i szczytowym. Ponieważ latencje odpowiedzi powstających w dwóch odległych przedziałach ślimaka różnią się znacznie między sobą, dlatego w wyniku procesu uśredniania może wystąpić wzajemne wykasowanie się odpowiedzi z obu przedziałów ślimaka, skutkiem czego w odpowiedziach nie stwierdzi się obecności fali V. Jeżeli badanie zakończy się zbyt wcześnie, oznaczony próg fali V może być znacznie wyższy niż w rzeczywistości. W praktyce należy zatem kontynuować badanie przynajmniej dla bodźca o intensywności o 10 dB niższej od intensywności, przy której nie zarejestrowano fali V.

IX. NIEWŁAŚCIWA INTERPRETACJA ZAPISU PRZY OZNACZANIU FALI V

Błędy wynikające z niewłaściwej interpretacji zapisu mogą prowadzić zarówno do zaniżenia, jak i podwyższenia rzeczywistego progu odpowiedzi. Występują one zazwyczaj wówczas, gdy odpowiedzi charakteryzują się bardzo niską jakością. W takich przypadkach o uniknięciu dużych błędów decyduje jedynie doświadczenie osoby interpretującej zapisy odpowiedzi.



Ryc. 6. Przykład niewłaściwej interpretacji zapisu odpowiedzi ABR z zarejestrowaną odpowiedzią sonomotoryczną

Do tej kategorii błędów można zaliczyć również błąd, który występuje wówczas, gdy odpowiedź sonomotoryczna zostanie mylnie zinterpretowana jako fala V. Na ryc. 6 przedstawiono tego typu sytuację. Osoba, która wykonywała badanie progowe, mylnie zinterpretowała odpowiedź sonomotoryczną o latencji ok. 12 ms jako falę V (ryc. 6a) i oceniła próg odpowiedzi ABR na podstawie progu odpowiedzi sonomotorycznej na poziomie 60 dB nHL. Amplituda odpowiedzi sonomotorycznej może być kilka lub kilkanaście razy większa niż fali V, dlatego jej rejestracja wymaga znacznie mniejszej liczby uśrednień oraz mniejszej czułości zapisu na ekranie urządzenia. Jeżeli odpowiedź ta, podobnie jak w prezentowanym przykładzie 6a, zostanie mylnie zinterpretowana jako fala V, zapis odpowiedzi nie będzie wzmacniany na ekranie urządzenia w stopniu wystarczającym do uwidocznienia fali V. Ponieważ próg odpowiedzi sonomotorycznej jest wyższy od progu fali V, dlatego ocena progu odpowiedzi ABR na podstawie progu odpowiedzi sonomotorycznej może prowadzić do zawyżenia oznaczonej wielkości ubytku słuchu.

Gdy zwiększono czułość zapisu fali V na ekranie, uwidoczniła się ona w odpowiedzi dla trzasku o niższych intensywnościach (ryc. 6b). Ostatecznie próg odpowiedzi oznaczony na podstawie progu fali V wynosi 10 dB nHL. Zatem błąd oznaczenia progu odpowiedzi ABR w prezentowanym przykładzie na skutek niewłaściwej interpretacji zapisu wynosił 50 dB.

W celu uniknięcia tego typu błędów należy sprawdzić czułość zapisu na ekranie urządzenia i latencję fali, która jest interpretowana jako fala V. Jeżeli czułość zapisu na ekranie urządzenia jest kilka razy mniejsza niż zazwyczaj oraz latencja fali wynosi ok. 12 ms, to należy podejrzewać, że mylnie zinterpretowano odpowiedź sonomotoryczną jako falę V.

*

Badanie progowe ABR jest badaniem łatwym pod warunkiem, że pacjent jest spokojny i nie generuje zbyt dużej liczby artefaktów mięśniowych podczas rejestracji odpowiedzi oraz gdy osoba wykonująca badanie jest świadoma różnych czynników mających wpływ na jakość odpowiedzi oraz ich interpretację. W niniejszej pracy omówiono tylko kilka z najczęstszych przyczyn błędów, które spotyka się w praktyce klinicznej i które powodują duże rozbieżności w wynikach badań przeprowadzanych u tej samej osoby w tym samym lub różnych ośrodkach audiologicznych.

Obserwacje z codziennej praktyki klinicznej wskazują, że spotykane błędy w progowych badaniach ABR najczęściej wynikają ze słabego przygotowania osób wykonujących badania oraz z nieprzestrzegania określonych procedur. Dlatego

duży nacisk należy położyć na organizację odpowiednich kursów szkoleniowych oraz opracowanie standardowych procedur badań. W tym celu zmierzają m.in. wysiłki realizatorów Programu Opieki nad Osobami z Uszkodzeniami Słuchu w Polsce.

Bibliografia

- Elberling C., Osterhammel P. A., 1992: Zastosowanie słuchowych potencjałów wywołanych w praktyce klinicznej, Warszawa: Alpicon.
- Finitzo-Hieber T., Friel-Patti S., 1985: Conductive hearing loss on the ABR. W: The auditory brainstem response. Ed. J. Jacobson, Taylor & Francis, London, 113-132.
- Gerull G., Mrowinski D., Janssen T., Anfit D., 1987: Auditory brainstem responses to single-slope stimuli. „Scand. Audiol.” 16, 227-235.
- Hall III J. W., 1992: Effect of acquisition factors. W: Handbook of auditory evoked responses. Ed. J. W. Hall III, Boston: Allyn & Bacon, 177-220.
- Hall III J. W., 1992: Peripheral auditory assessment. W: Handbook of auditory evoked responses. Ed. J. W. Hall III, Boston: Allyn and Bacon, 346-384.
- Hyde M. L., 1985: Instrumentation and signal processing. W: The auditory brainstem response. Ed. J. T. Jacobson, London: Taylor & Francis, 133-146.
- Javel E., 1986: Basic response properties of auditory nerve fibers. W: Neurobiology of hearing. The cochlea. Ed. R. A. Altschuler, R. P. D Bobbin, Hoffman, New York: Raven Press, 213-245.
- Kiang N. Y. S., Watanabe T., Thomas E. C., Clark L. F., 1962: Discharge patterns of single fibers in the cat's auditory nerve. Cambridge, Mass.: M. I. T. Press. Research Monograph. No. 35.
- Kochanek K., Skarżyński H., Janczewski G., Jędrusik A., Piłka A., Olczak J., 1996: Ocena progu słyszenia dla 500 Hz oraz w zakresie częstotliwości 2-4 kHz za pomocą słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu. „Audiofonologia” 8, 51-57.
- Musiek F., Gollegly K., 1985: ABR in eight nerve and low brainstem lesions. W: The auditory brainstem response. Ed. J. Jacobson, London: Taylor & Francis, 181-202.

Bibliografia

- Elberling C., Osterhammel P. A., 1992: Zastosowanie słuchowych potencjałów wywołanych w praktyce klinicznej, Warszawa: Alpicon.
- Finitzo-Hieber T., Friel-Patti S., 1985: Conductive hearing loss on the ABR. W: The auditory brainstem response. Ed. J. Jacobson, Taylor & Francis, London, 113-132.
- Gerull G., Mrowinski D., Janssen T., Anfit D., 1987: Auditory brainstem responses to single-slope stimuli. „Scand. Audiol.” 16, 227-235.
- Hall III J. W., 1992: Effect of acquisition factors. W: Handbook of auditory evoked responses. Ed. J. W. Hall III, Boston: Allyn & Bacon, 177-220.
- Hall III J. W., 1992: Peripheral auditory assessment. W: Handbook of auditory evoked responses. Ed. J.W. Hall III, Boston: Allyn and Bacon, 346-384.
- Hyde M. L., 1985: Instrumentation and signal processing. W: The auditory brainstem response. Ed. J. T. Jacobson, London: Taylor & Francis, 133-146.
- Javel E., 1986: Basic response properties of auditory nerve fibers. W: Neurobiology of hearing. The cochlea. Ed. R. A. Altschuler, R. P. D Bobbin, Hoffman, New York: Raven Press, 213-245.
- Kiang N. Y. S., Watanabe T., Thomas E. C., Clark L. F., 1962: Discharge patterns of single fibers in the cat's auditory nerve. Cambridge, Mass.: M. I. T. Press. Research Monograph. No. 35.
- Kochanek K., Skarżyński H., Janczewski G., Jędrusik A., Piłka A., Olczak J., 1996: Ocena proggu słyszenia dla 500 Hz oraz w zakresie częstotliwości 2-4 kHz za pomocą słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu. „Audiofonologia” 8, 51-57.
- Musiek F., Gollegly K., 1985: ABR in eight nerve and low brainstem lesions. W: The auditory brainstem response. Ed. J. Jacobson, London: Taylor & Francis, 181-202.