

Urszula Joras

Instytut Akustyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza
Poznań

Percepcyjne konsekwencje uszkodzenia ślimaka

Perceptual Consequences of Cochlear Damage

Streszczenie

Praca zawiera krótki przegląd zmian percepcji słuchowej towarzyszących ślimakowemu ubytkowi słuchu. Opisano także próby wyjaśnienia, dlaczego zmiany te występują.

Summary

The main goal of this paper is to present a short review of the perceptual changes associated with cochlear hearing loss, and of the difficulties faced by the hearing-impaired person. The question is not only what happens, but also why it happens.

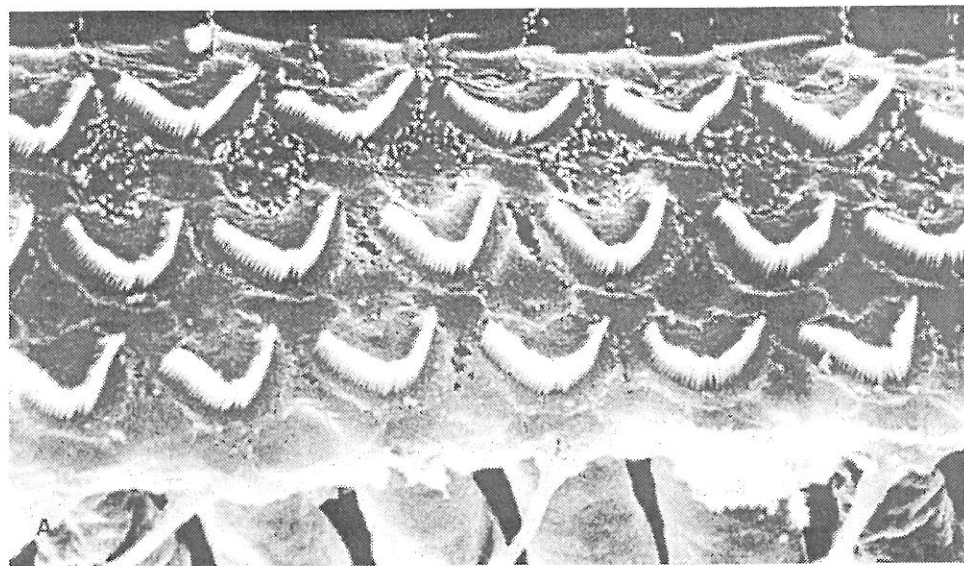
Badania pracy układu słuchowego otologicznie normalnego i zmienionego patologią stanowią wzajemnie się uzupełniającą całość. Teorie dotyczące normalnego funkcjonowania układu słuchowego nie są kompletne, jeżeli nie biorą pod uwagę zjawisk obserwowanych przez klinicystów przy patologicznych zmianach układu. Chęć przyjscia z pomocą osobom niesłyszącym motywuje bardzo wiele badań nad percepcją słuchową. To, czego dowiemy się o procesie słyszenia patologicznego, może wymazywać białe plamy w analizie słyszenia, szczególnie w zakresie percepcji głośności, wysokości czy rozróżnialności struktury czasowej.

Dlaczego możemy uznać głuchotę ślimakową za reprezentatywną dla patologicznych zmian układu słuchowego? Głuchota ślimakowa stanowi najbardziej rozpowszechnioną formę ubytków słuchu. Wystarczy uświadomić sobie fakt, iż uszkodzenie ślimaka to najprawdopodobniej zasadnicza przyczyna *presbyacsis*, czyli ubytków słuchu związanych z fizjologicznym starzeniem się organizmu. Uszkodzenie ślimaka może wystąpić ponadto na skutek eks-

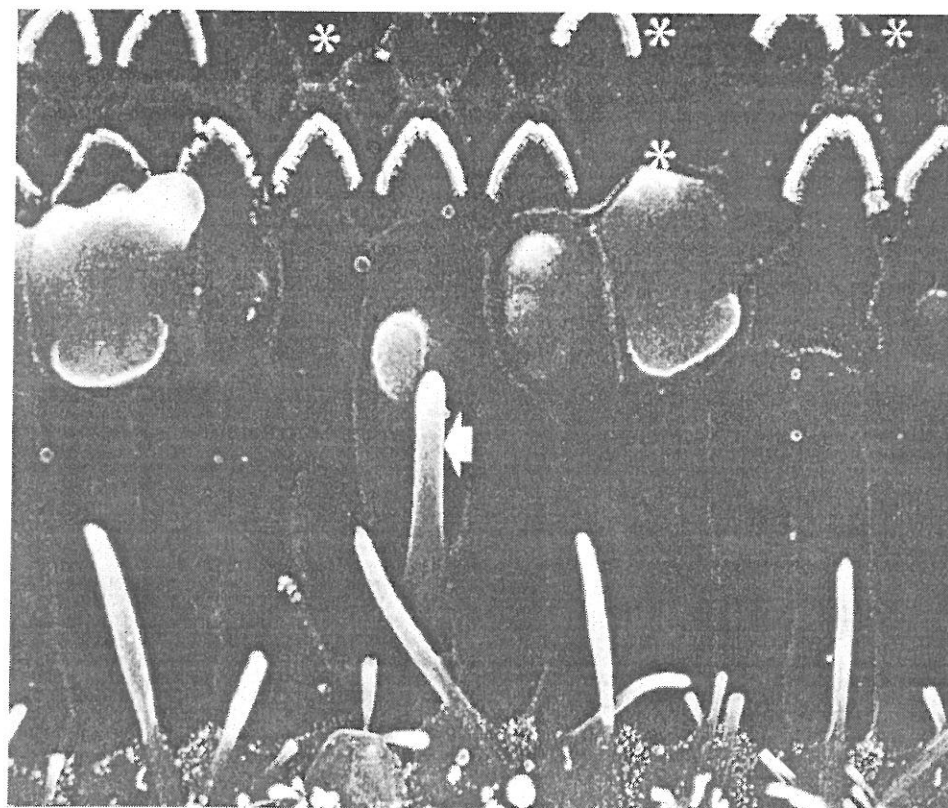
pozycji zbyt intensywnych dźwięków czy przez używanie leków ototoksycznych (np. niektórych antybiotyków). Mogą je wywołać infekcje, zaburzenia metaboliczne lub genetyczne, niektóre typy alergii.

Uszkodzeniu ślimaka niejednokrotnie towarzyszy brak sprawności wyższych pięter układu słuchowego, a także głuchota przewodzeniowa, czyli obniżenie transmisji dźwięku przez ucho zewnętrzne i środkowe (częsty powód to wosk gromadzący się w kanale słuchowym i źle działające kosteczki). Powoduje to osłabienie intensywności dźwięków docierających do i tak uszkodzonego ślimaka. Ten typ głuchoty można jednak leczyć zachowawczo lub chirurgicznie. A zatem przeanalizowanie percepcyjnych konsekwencji uszkodzenia ślimaka daje nam orientację o bardzo szerokiej gamie stanów patologicznych.

Jakie najważniejsze funkcje ślimaka mogą zostać zaburzone na skutek jego uszkodzenia? W ocenie sprawności ślimaka ogromnie ważną rolę odgrywa proces aktywny w nim zachodzący. Odpowiedzialność za aktywną część pracy ślimaka ponoszą prawdopodobnie zewnętrzne komórki słuchowe. One najczęściej jako pierwsze tracą sprawność działania ze względu na znacznie większą podatność na uszkodzenia niż komórki wewnętrzne. Na dwu fotografiach (rys. 1 a, 1 b) przedstawiono widok zewnętrznych komórek słuchowych nie zniszczonych i uszkodzonych na skutek ekspozycji hałasu. Widzimy kompletny zanik wielu komórek, podczas gdy pozostałe straciły uporządkowanie, jakie cechuje komórki w nie uszkodzonym ślimaku.



Rys. 1. Zdjęcie z mikroskopu skaningowego przedstawiające zewnętrzne komórki słuchowe
a) nie zniszczone (skala 6000 : 1)



b) 10 miesięcy po ekspozycji hałasu (skala 2200 : 1) (gwiazdki oznaczają miejsca, gdzie komórki zanikły)

Rola ślimaka polega na nieliniowej odpowiedzi błony podstawnej na bodziec akustyczny i przekazaniu impulsów neuralnych do nerwu słuchowego. Nieliniowość odpowiedzi oznacza brak proporcjonalności między wychyleniem błony podstawnej a intensywnością bodźca akustycznego. Jest ona *notabene* powiązana z właściwym funkcjonowaniem mechanizmu aktywnego w ślimaku. Jego uszkodzenie musi odbić się na odpowiedzi błony podstawnej, prędkości lub amplitudzie jej wibracji.

Uprawnione jest zatem domniemanie, że transformacja tego, co dzieje się na błonie podstawnej, na aktywność neuralną będzie też zakłócona. Właściwością potencjałów czynnościowych jest synchroniczność fazowa z bodźcem. Wprawdzie niewiele jest prac na ten temat, a te, które są, nie tłumaczą jednoznacznie wpływu uszkodzenia ślimaka na synchronizację fazową, wydaje się niewątpliwe, że wpływ ten istnieje.

Najpoważniejszą dolegliwością osób z uszkodzonym ślimakiem jest zakłócona zrozumiałość mowy. Sytuację pogarsza fakt, że problemu tego nie rozwiązują konwencjonalne aparaty słuchowe, ponieważ nie kompensują one upośledzenia poszczególnych funkcji percepcyjnych układu słuchowego. Ba-

dania konsekwencji uszkodzenia ślimaka dają szansę opracowania nowej generacji aparatów słuchowych, które spożytkowałyby dane psychoakustyczne.

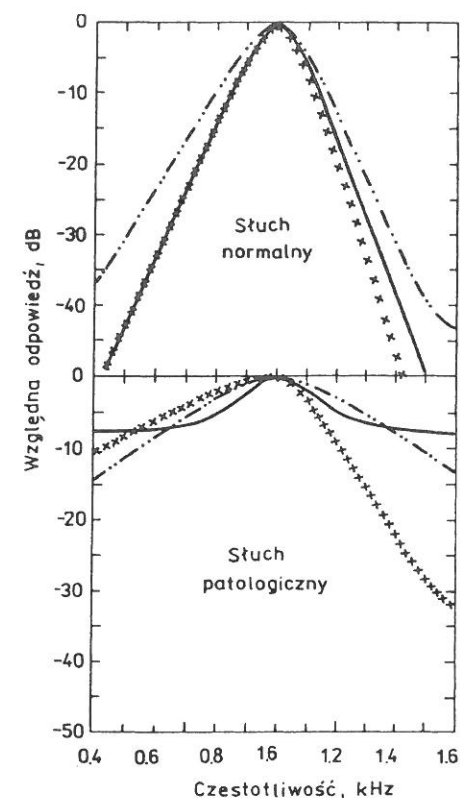
W ostatnich 10-15 latach dokonały się rewolucyjne zmiany w rozumieniu mechanizmu analizowania dźwięku w ślimaku, głównie dzięki ogromnemu postępowi w dziedzinie fizjologii. Znacznie lepiej poznana została też głuchota ślimakowa. Wyraźnie opóźnione jest spożytkowanie danych fizjologicznych przez psychoakustykę, która nie nadąża z interpretacją percepcyjną. Analizując więc konsekwencje percepcyjne uszkodzenia ślimaka, wielokrotnie używać będziemy trybu przypuszczającego, nie mając dostatecznej liczby danych eksperymentalnych, aby posługiwać się trybem oznajmującym.

I. SELEKTYWNOŚĆ CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

Nadrzędną funkcją układu słuchowego jest słyszenie jednego dźwięku na tle innych, czego odzwierciedleniem jest selektywność częstotliwościowa układu. Odgrywa ona ponadto ważną rolę w innych formach percepcji słuchowej. Rozpatrywanie percepcyjnych konsekwencji uszkodzenia ślimaka rozpoczniemy zatem od analizy zmiany selektywności częstotliwościowej. Miarą selektywności częstotliwościowej jest maskowanie, a ono zupełnie dobrze tłumaczy się przy zaangażowaniu tego, co dzieje się na peryferiach układu słuchowego. Uszkodzony ślimak musi więc oznaczać pogorszenie selektywności częstotliwościowej.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki [Glasberg, Moore 1986] wyznaczania kształtu filtrów słuchowych dla trzech słuchaczy. Górny rysunek to filtry dla ucha zdrowego, dolny — dla ucha z głuchotą ślimakową. Kształt filtrów słuchowych dla uszu zdrowych jest podobny i wskazuje na dobrą selektywność częstotliwościową. Filtry na dolnym rysunku są zróżnicowane międzyosobniczo i wszystkie są szersze niż normalnie. Szczególnie uderzające jest rozszerzenie po stronie niskich częstotliwości. Wiąże się to ze wzrostem maskowania przez dźwięki z przewagą składowych niskoczęstotliwościowych, takich jak szum samochodowy lub szum z wentylatora.

Wyciąganie wniosku o obniżonej selektywności częstotliwościowej na podstawie rozszerzenia filtra słuchowego jest oparte na prostej postaci modelu maskowania pochodzącej wprost od Fletchera: tylko ta część energii szumu maskującego, którą przepuszcza określony filtr słuchowy, bierze udział w maskowaniu. Rozszerzony filtr to większa energia szumu maskującego, mniejsza zdolność układu słuchowego do selektywnego słyszenia. Każda inna postać modelu zwiększa porcję energii zaangażowanej w maskowanie poprzez włączenie w proces słyszenia większej liczby filtrów słuchowych. (Jest to na przykład konieczne, kiedy rozpatrujemy maskowanie dla sygnałów zmiennych w czasie).



Rys. 2. Filtry słuchowe o częstotliwości środkowej 1 kHz dla ucha normalnego (góra) i patologicznego (dół), uzyskane dla trzech słuchaczy z jednostronną głuchotą odbiorczą

Jednym z elementów, które komplikują porównywanie selektywności częstotliwościowej u osób bez zmian patologicznych i ze zmianami, jest intensywność bodźców. U słuchaczy normalnie słyszących wzrost intensywności bodźca powoduje rozszerzenie filtra słuchowego po stronie niskich częstotliwości. Ma to prawdopodobnie związek z mechanizmem aktywnym w ślimaku. Przy niskich intensywnościach mechanizm ten wnosi przypuszczalnie większy wkład w strojenie filtra słuchowego dla niskich częstotliwości. Wzrost poziomu bodźca redukuje przyczynki pochodzące od mechanizmu aktywnego i stąd mniejsze strojenie filtra słuchowego — rozszerzenie — dla niskich częstotliwości.

Wydaje się wielce prawdopodobne, że mechanizm aktywny jest uszkodzony lub wręcz zanika wraz z uszkodzeniem ślimaka, stąd zmiany w selektywności częstotliwościowej wraz ze wzrostem poziomu w takich przypadkach nie występują lub są znacznie mniej wyraźne. W rezultacie różnice między słuchaczami normalnie słyszącymi i z uszkodzeniami ślimaka zmniejszają się przy wysokich intensywnościach bodźca. Niewłaściwe może być

porównywanie selektywności wyznaczonej przy użyciu małych intensywności — u słuchaczy otologicznie normalnych — z tą wyznaczoną przy wyższych intensywnościach — dla słuchaczy z patologią ślimaka. Ponieważ dla tych ostatnich najczęściej stosujemy wyższe poziomy, część rozszerzenia filtra może pochodzić od wpływu intensywności, która i dla słuchaczy otologicznie normalnych też by wystąpiła.

Następną sprawą jest związek między progiem absolutnym a szerokością filtra słuchowego. Wprawdzie można zaryzykować twierdzenie, że podwyższenie progu, czyli wielkość ubytku słuchu, wiąże się z obserwowaną szerokością filtra, jednak istnieją dość znaczne odstępstwa od tej reguły. Ubytki słuchu rzędu 40-50 dB mogą powodować 4-5-krotne rozszerzenie filtra w stosunku do normalnego, ale u niektórych słuchaczy szerokość filtra słuchowego może być niemal normalna.

Różnice w efektywności maskowania między osobami z uszkodzonym a nie uszkodzonym ślimakiem zależą w znacznym stopniu od charakterystyki widmowej sygnału i maskera. Jeżeli oba sygnały różnią się nieznacznie widmowo, to progi maskowania są na ogół tylko niewiele wyższe na skutek uszkodzenia ślimaka. Natomiast im różnice widmowe między sygnałem a maskerem są większe, tym uszkodzenie ślimaka może zdecydowanie bardziej wpływać na wartość progów maskowania.

II. PERCEPCJA GŁOŚNOŚCI

Redukcja czy wręcz zanik słyszenia dźwięku na skutek podwyższenia progu absolutnego jest pierwszym, najbardziej charakterystycznym, objawem patologii układu słuchowego. Ponadto u zdecydowanej większości osób, jeżeli nie po prostu u wszystkich, u których uszkodzony jest ślimak, występuje nienormalny odbiór głośności dźwięku. Odbiegające od normy narastanie głośności w stosunku do intensywności dźwięku jest znaczącym czynnikiem psychoakustycznym, wpływającym na zrozumiałość mowy i percepcję muzyki. Streścić je można słowami: niesłyszalne *piano* i prawie normalnie słyszalne *forte*.

Pacjenci z nieproporcjonalnie narastającą głośnością nie słyszą słabych dźwięków ze względu na podwyższony próg słyszalności, natomiast dźwięki o znacznej intensywności są dla nich tak głośne, jak gdyby nie mieli oni ubytków słuchu. Ich problemy można sprowadzić do tego, co oni sami mówią o swojej sytuacji: „Proszę do mnie nie mówić tak głośno. Ja słyszę, ale nie rozumiem, co pan do mnie mówi”. Głośne dźwięki percypują wprawdzie, ale nie wystarcza to do porozumienia się. Zrozumiałość mowy wymaga zatem uruchomienia innego jeszcze mechanizmu.

1. Patologiczne narastanie głośności. Objaw wyrównania głośności (OWG)

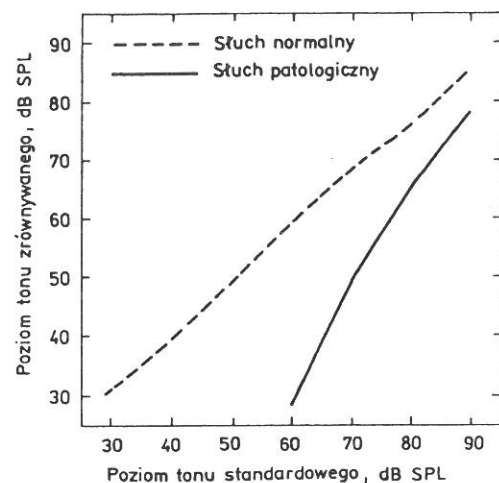
Przy uszkodzeniu ślimaka często występuje tzw. objaw wyrównania głośności. OWG może być zademonstrowany szczególnie wyraźnie, jeżeli ubytek słuchu jest jednostronny. W pobliżu progu bodźce są równogłośne wtedy, gdy bodziec w uchu uszkodzonym ma intensywność większą niż w uchu zdrowym o wartość ubytku słuchu. Natomiast w okolicy ok. 80 dB SPL wyrównanie głośności następuje przy tej samej intensywności w obojgu uszach. Patologiczna percepcja głośności oznacza znacznie szybszy niż normalnie wzrost głośności towarzyszący wzrostowi intensywności bodźca.

Na rys. 3 przedstawiono uśrednione wyniki [Moore (i inni) 1985] zrównywania głośności tonu dla pięciu słuchaczy z jednostronną głuchotą ślimakową. Średnią wartość zrównanego poziomu ciśnienia akustycznego w uchu normalnym przedstawiono jako funkcję poziomu ciśnienia akustycznego w uchu uszkodzonym. Dla porównania zamieszczono obraz zrównywania głośności dla słuchacza bez patologicznych zmian układu słuchowego (linia przerywana).

Jak należało przewidywać, dla słuchacza otologicznie zdrowego zrównanie głośności w obojgu uszach następuje przy prawie równych poziomach ciśnienia akustycznego (nachylenie linii przerywanej jest prawie równe jedności; dla większych intensywności ton zrównywany ma nieco wyższy poziom ciśnienia akustycznego niż ton standardowy). W przypadku uszkodzenia ślimaka obraz zrównywania głośności w obojgu uszach się zmienia. Poziom 60 dB SPL (wartość ubytku słuchu) w uchu uszkodzonym zrównywany jest z poziomem ok. 30 dB SPL w uchu zdrowym, przy czym dla większych intensywności tonu różnica między tymi wartościami maleje, aby w okolicy ok. 80 dB SPL wynieść ok. 10 dB. Gdyby nie dyskomfort akustyczny, jaki pojawiał się dla słuchaczy w okolicy 90 dB SPL, należy przypuszczać, że poziomy w obu uszach zrównałby się.

Przy szczególnie dużych ubytkach słuchu może nie wystąpić objaw wyrównania głośności w obojgu uszach i głośność w uchu uszkodzonym jest niższa. Mówimy wtedy o częściowym wzmocnieniu głośności. Występuje także zjawisko odwrotne, kiedy głośność w uchu patologicznym jest wyższa niż w uchu zdrowym. Jest to dodatkowe wzmocnienie głośności.

Jakie czynniki odpowiedzialne są za anormalny wzrost głośności? Podwyższeniu progu słyszalności i — co za tym idzie — zredukowaniu słyszenia dźwięków o niewielkiej intensywności towarzyszy ograniczenie nieliniowego zachowania się błony podstawnej. To właśnie wydaje się główną przyczyną wzmocnienia głośności. Z fizjologicznego punktu widzenia jest to związane z zanikiem lub zakłóceniem procesów aktywnych w ślimaku, za co odpowiedzialne są głównie zewnętrzne komórki słuchowe. Zredukowana selek-



Rys. 3. Wyniki zrównywania głośności impulsów tonalnych, prezentowanych naprzemiennie do ucha lewego i ucha prawego dla słuchaczy otologicznie normalnych (linia przerywana) i z jednostronnie uszkodzonym ślimakiem

tywność częstotliwościowa może też odgrywać pewną, niewielką rolę, choć głównie w percypowaniu głośności, a nie w jej nienormalnym narastaniu.

2. Adaptacja

Adaptacja ma najprawdopodobniej związek ze zrównoważeniem energii procesów metabolicznych z wydatkiem energii receptora słuchowego. Jeżeli procesy metaboliczne są zakłócone patologią na jakimkolwiek odcinku układu słuchowego, to może wystąpić szczególnie intensywne obniżenie głośności bodźca w czasie jego ekspozycji.

Adaptacja patologiczna jest wyraźniejsza przy uszkodzeniu włókien nerwowych niż przy uszkodzeniu ślimaka. Wydaje się jednak mało prawdopodobne, aby włókna eferentne odgrywały w tym jakąkolwiek rolę [por. Scharf 1992]. Pomiary OWG i adaptacji są więc wartościowe dla identyfikacji miejsca uszkodzenia układu słuchowego.

3. Inne aspekty percepcji głośności

Sumowanie głośności objawiające się jej wzrostem, kiedy szerokość pasma szumu przekracza wstęgę krytyczną, jest zaburzone u osób z uszkodzonym ślimakiem. Wzrost głośności jest mniejszy niż normalnie. Wydaje się to mieć związek ze zredukowaniem selektywności częstotliwościowej. Zatem szum wąsko- i szerokopasmowy o tej samej intensywności różnią się głośnością znacznie mniej niż normalnie lub nawet wcale się nie różnią.

Większe niż normalnie zmiany głośności towarzyszące zmianom intensywności dźwięku sugerować mogą, że detekcja zmian intensywności u osób

z patologią ślimaka jest lepsza niż normalnie. Stanowi to podstawę wykorzystywanego przez klinicystów testu SISI jako wskaźnika uszkodzenia ślimaka [Lüscher, Zwisłocki 1949; Buus (i inni) 1982]. Nie kwestionując jego przydatności klinicznej, wydaje się kontrowersyjne założenie o lepszej niż normalna analizie zmian głośności. Byłoby tak, gdyby progi różnicy głośności nie ulegały zmianie na skutek uszkodzenia ślimaka. Wydaje się jednak, że szybsze narastanie głośności rzutuje na niestabilność wartościowania głośności i szczególnie przy ocenie głośności jednego dźwięku na tle innych nie daje preferencji przy dyskryminacji intensywności.

III. SPOSTRZEGANIE STRUKTURY CZASOWEJ SYGNAŁU

Analizę zmian w spostrzeganiu struktury czasowej dźwięku na skutek uszkodzenia ślimaka opieramy na tym, co dzieje się w obrębie pojedynczego filtra słuchowego. Jest bowiem bardzo mało prac dotyczących międzyfiltrowej obróbki sygnału przez osoby z patologią układu słuchowego.

Dane psychoakustyczne wykazują, że analiza struktury czasowej pewnej kategorii dźwięków zależy od uszkodzenia ślimaka i jest najczęściej gorsza niż normalnie. Nie jest to wcale oczywiste ani na podstawie danych fizjologicznych, ani danych psychoakustycznych. Uszkodzenie ślimaka zwierząt spowodowane ekspozycją hałasu lub lekami ototoksycznymi nie powoduje zaburzeń w odwzorowaniu struktury czasowej dźwięków w odpowiedziach neuronów nerwu słuchowego. Z kolei rozszerzenie filtra słuchowego związane z uszkodzeniem ślimaka mogłoby prowadzić do lepszej niż normalna analizy struktury czasowej, ponieważ szerokie filtry — mając krótszy czas odpowiedzi impulsowej niż wąskie filtry — mogą lepiej odwzorowywać zmiany zachodzące na ich wejściu.

Obserwowany wpływ uszkodzenia ślimaka na pogorszenie odwzorowania struktury czasowej dźwięku może być związany z czynnikami, które nie mają bezpośredniego związku z obróbką czasową sygnału. Należą do nich obniżenie poziomu odczucia na skutek podwyższenia progu absolutnego i zanik spostrzegania składowych wysokoczęstotliwościowych, które wnoszą istotną informację o strukturze czasowej dźwięku.

Wzrost fluktuacji głośności u osób z nieproporcjonalnie narastającą głośnością, co — jak mówiliśmy — jest związane z redukcją nieliniowej pracy układu słuchowego, może utrudniać spostrzeganie przerw w sygnale. Nieprzewidywalne fluktuacje amplitudy w czasie, które są nieodłącznie związane z dźwiękami rzeczywistymi, mogą być z trudem śledzone przez osoby z uszkodzonym ślimakiem.

Redukcja nieliniowego charakteru pracy błony podstawnej wydaje się też odpowiedzialna za zmniejszoną zdolność do „integracji” czasowej. (Terminu

„integracja” używamy w cudzym słowie, ponieważ niektórzy kwestionują tego typu obróbkę w układzie słuchowym. Mówi się, że dłuższy czas występowania sygnału zwiększa po prostu prawdopodobieństwo jego detekcji). Wpływa to w różny sposób na pogorszenie słyszalności słabych dźwięków krótko- i długotrwałych. U osób z normalnym słuchem „integracja” czasowa pracuje na korzyść słyszalności słabych, ale długotrwałych dźwięków. Jeżeli mechanizm ten jest rozregulowany, to różnica między słyszalnością dźwięków o niewielkiej intensywności u osób o słuchu normalnym i patologicznym jest mniej wyraźna dla dźwięków krótkotrwałych niż dla długotrwałych.

IV. PERCEPCJA WYSOKOŚCI

Rozszerzenie filtra słuchowego związane z uszkodzeniem ślimaka powinno — zgodnie z teorią miejsca — prowadzić do pogorszenia dyskryminacji częstotliwości. Natomiast jeżeli interpretujemy tę dyskryminację opierając się na teorii czasu, to rozszerzony filtr słuchowy nie musi się wiązać z pogorszeniem dyskryminacji częstotliwości. Może ją jednak redukować zaburzona synchroniczność fazowa, która najprawdopodobniej towarzyszy głuchocie ślimakowej.

Wyniki badań progów różnicy częstotliwości [np. Moore, Peters 1992] wskazują na niewątpliwe pogorszenie dyskryminacji częstotliwości. Występują jednak znaczne różnice międzyosobnicze i brak wyraźnego związku między wartościami progów a ubytkiem słuchu dla danej częstotliwości dźwięku.

Jest natomiast bardzo mało danych dotyczących progu spostrzegania modulacji częstotliwości dla słuchaczy z uszkodzonym ślimakiem. Te, które opublikowano, wskazują, że progi te są wyższe niż normalnie.

Jeżeli idzie o dyskryminację wysokości wielotonów przez osoby z uszkodzonym ślimakiem, to kluczową rolę wydaje się pełnić synchroniczność fazowa. Jeżeli nie jest ona zaburzona, to słuchacze mogą wykazywać zupełnie dobrą dyskryminację wysokości, i to niezależnie od rozszerzenia filtrów słuchowych.

Warto tu wspomnieć o *diplacusis*. U osób z jednostronną patologią ślimaka lub asymetrycznym ubytkiem słuchu (niekiedy nawet przy jednakowym ubytku w obojgu uszach) może występować różna percepcja wysokości tonu prezentowanego do obojga uszu. Wielkość międzyusznego przesunięcia wysokości jest cechą zdecydowanie indywidualną i zależy od poziomu dźwięku. Wydaje się prawdopodobne — choć brak jest danych fizjologicznych dotyczących zależności między intensywnością dźwięku a synchronizacją fazową u osób z uszkodzonym ślimakiem — że centralny mechanizm analizujący dane czasowe i odpowiedzialny za kształtowanie się wrażenia wysokości zbiera informacje o czasie rozchodzenia się fali wędrującej na błonie podstawnej. Ten czas może być zmieniony na skutek uszkodzenia ślimaka. Ogólnie więc zaburzony może być wkład informacji czasowej w for-

mowanie się wrażenia wysokości. Dla częstotliwości mniejszych od ok. 5 kHz oznacza to poważne zmniejszenie szansy właściwego kształtowania się wrażenia wysokości dźwięku.

Percepcja wysokości odgrywa istotną rolę w zrozumiałości mowy. Po wszechnie znana jest teza, że osoby mające dobry słuch muzyczny uczą się lepiej i szybciej języków obcych niż inne. Melodia języka stanowi bowiem jego istotny atrybut i stąd uprzywilejowanie — lub upośledzenie — osób, które informację zawartą w zmianie wysokości (melodii) przyswajają lub nie.

V. LOKALIZACJA ŹRÓDŁA DŹWIĘKU

Najistotniejsze wskazówki o lokalizacji źródła dźwięku czerpie układ słuchowy z faktu swojej binauralności. Międzyuszne różnice czasu oraz intensywności, podstawowe parametry fizyczne, na których podstawie układ słuchowy określa kierunek źródła dźwięku, wynikają z różnicy dróg dźwięku do obojga uszu. Zatem wszystko, co pozbawia układ słuchowy umiejętności oceny różnic międzyuszných lub różnice te czyni podprogowymi, powoduje dezorientację przestrzenną. Wpływ uszkodzenia ślimaka na orientację przestrzenną słuchacza podporządkowany jest następującym zasadom:

1. Istnieją znaczne różnice indywidualne zarówno co do samego występowania lub braku wpływu, jak i co do jego wielkości.

2. Brak jest ścisłej korelacji między przebiegiem progów absolutnych a utratą zdolności wykorzystywania dość licznych wskazówek lokalizacyjnych.

3. Symetryczne, obu stronnie, uszkodzenie ślimaka nie powoduje dramatycznych zmian w zdolności do lokalizacji źródła dźwięku. Każde odstępstwo od symetrii wprowadza większy stopień dezorientacji przestrzennej.

Dwie pierwsze zasady są prawdziwe dla percepcji wielu atrybutów wrażenia słuchowego.

Jeżeli dyskryminacja międzyuszných różnic czasu lub intensywności (za- leżnie od częstotliwości sygnału efektywność obu tych parametrów się zmienia) jest podstawą oceny kierunku, z którego dźwięk dociera do obserwatora, to powstaje pytanie, jakie mogą być przyczyny słabszej niż normalna rozróżnialności, jeżeli uszkodzony jest ślimak. Pierwszą przyczyną może być niski poziom odczucia dźwięku. Dla słuchaczy otologicznie normalnych dyskryminacja międzyuszných różnic czasu pogarsza się wyraźnie, jeżeli poziom odczucia dźwięku obniża się do ok. 20 dB SL [Häusler (i inni) 1983]. Poza tym może to być wynik zakłóceń w obróbce sygnału na poziomie błony podstawnej i dalej we włóknach nerwu słuchowego [Ruggero, Rich 1987; Ruggero (i inni) 1993]. Może to być wreszcie rezultat zakłóceń w synchronizacji fazowej między bodźcem a impulsami neuralnymi. Jeżeli idzie o międzyuszne różnice intensywności, to zakłócenia w systemie jej kodo-

wania mogą dezorientować układ słuchowy i nie pozwalają spożytkować wskazówek dla orientacji przestrzennej.

Innego rodzaju korzyść z binauralności związana jest z detekcją sygnału na tle szumu. Porównywanie bodźców dochodzących z obojga uszu może zwiększać szansę detekcji sygnału. Wreszcie fakt binauralności może wytwarzać międzyuszną różnicę poziomów maskowania sygnału na tle szumu MLD. Jeżeli np. sygnał i szum dochodzą do obojga uszu w różnych fazach lub z różnych kierunków, to powstają warunki do różnej międzyusznej efektywności maskowania. Jeżeli sygnałem jest mowa, a w warunkach rzeczywistych zawsze towarzyszy jej szum, to zdolność do spożytkowania wskaźników binauralnych może znacznie poprawić słyszalność, a także zrozumiałość — choć już w mniejszym stopniu — mowy w hałasie.

Generalnym skutkiem uszkodzenia ślimaka jest zmniejszenie się międzyusznych różnic poziomu maskowania, nawet wtedy, kiedy uszkodzenie jest jednakowe w obojgu uszach. Zmniejsza się więc także możliwość wykorzystania tego parametru dla lepszej zrozumiałości mowy na tle szumu. Przyczyny mniejszych niż normalnie MLD — jakkolwiek nie są one całkowicie jasne — można sprowadzić do obniżenia poziomu odczucia i pogorszenia dyskryminacji różnic międzyusznych. Głuchota ślimakowa redukuje także zdolność wykorzystywania przez słuchacza różnicy położenia źródła sygnału i źródła szumu maskującego.

W przypadku uszkodzenia ślimaka przestają też wносить swój przyczynek do lokalizacji źródła różnice widmowe, które wywołuje małżowina uszna. Mogą one być po prostu niesłyszalne lub nierozpoznawalne. Skutkiem tego są trudności w rozpoznawaniu kierunków przód–tył oraz góra–dół. Na uwagę zasługuje fakt, że właśnie wskazówki widmowe wnoszone przez małżowinę zmieniają się lub wręcz zanikają przez obecność protez słuchowych. Aparaty słuchowe zmieniają obwiednię widma w przewodzie słuchowym i z reguły nie wzmacniają składowych o częstotliwościach większych niż 6 kHz, dla których wskazówki wnoszone przez małżowinę są szczególnie efektywne.

Wszystko, co powiedzieliśmy dotychczas, dotyczyło oceny kierunku źródła dźwięku. Ocena odległości od nie znanego obserwatorowi źródła dźwięku jest zawsze mniej precyzyjna niż określenie kierunku. Dwa zasadnicze atrybuty wrażenia słuchowego, które zmieniają się ze wzrostem odległości — zmiana głośności oraz barwy (zanik składowych wysokoczęstotliwościowych) — percypowane są przez osoby z uszkodzonym ślimakiem w sposób szczególnie patologiczny. Nie może to nie mieć wpływu na ocenę odległości.

VI. PERCEPCJA BARWY DŹWIĘKU

Istotną determinantą barwy dźwięku jest obwiednia widmowa. Jest ona odwzorowana w modelu pobudzenia błony podstawnej wywołanym przez

dźwięk. Przy zredukowanej selektywności częstotliwościowej model pobudzenia odzwierciedla mniejszą liczbę detali struktury widmowej niż w przypadku ucha normalnego. Redukcji ulega zatem zdolność rozróżnienia dźwięków na podstawie obwiedni widmowej. Jeżeli różnice między dźwiękami dotyczą subtelnej struktury widmowej, to ich rozpoznanie może być znacznie utrudnione. Dotykamy w ten sposób kwestii wpływu uszkodzenia ślimaka na percepcję mowy. Różnice między obwiedniami widmowymi poszczególnych samogłosek mogą tkwić właśnie w subtelnościach struktury widmowej i stąd trudności w ich rozpoznawaniu.

VII. ZAKŁÓCENIA W KOMUNIKACJI SŁOWNEJ

Trudności ze zrozumieniem mowy, szczególnie kiedy towarzyszy jej szum tła, są najbardziej charakterystyczną cechą patologicznej percepcji słuchowej, przedmiotem największej troski osób z uszkodzonym ślimakiem. Musimy zdawać sobie sprawę z tego, że mowa jest tak specyficznym sygnałem, że upośledzenie każdego elementu percepcji słuchowej odbija się niekorzystnie na zrozumiałości mowy.

Zacznijmy od oczywistego stwierdzenia, że stopień trudności zależy od wielkości ubytku słuchu. Przy ubytkach rzędu 27-55 dB (ubytki słuchu do 26 dB uważane są za normalne [por. np. Goodman, cyt. przez Moore'a 1995]) zrozumiałość mowy w ciszy i przy jednym tylko mówcy jest dość dobra. W przypadku wielu mówców i wyraźnego tła akustycznego pojawiają się trudności. Każdy wzrost niedosłuchu zwiększa kłopoty ze zrozumiałością mowy, szczególnie jeżeli występuje szum maskujący. Pozostaje wtedy czytanie z ust i wykorzystywanie kontekstu.

Nie jest sprawą jasną, dlaczego uszkodzenie ślimaka powoduje zakłócenia w komunikacji słownej. Interpretacja tych zjawisk wcale nie jest jednoznaczna. Jedni uważają, że powodem jest zawężenie obszaru słyszalności na skutek podwyższenia progu słyszalności. Wyższy niż normalnie próg słyszalności powoduje, że obszar, w którym mowa jest sygnałem powyżej progowym, jest mniejszy. Inni natomiast dopatrują się powodu trudności w obniżeniu zdolności dyskryminacyjnych układu słuchowego dla sygnałów powyżej progowych. Wydaje się, że pierwsza przyczyna dominuje w przypadku ubytków do ok. 40 dB, natomiast druga dołącza się, kiedy ubytki słuchu są większe.

Wspominaliśmy już o tym, że osoby z uszkodzonym ślimakiem mają trudności ze śledzeniem zmian obwiedni widma w czasie. Jeżeli zatem tło fluktuuje, to trudności ze zrozumiałością mowy stają się szczególnie wyraźne. Może być wtedy potrzebna znacznie większa różnica poziomów ciśnienia akustycznego między sygnałem a maskerem dla recepcji mowy.

Uszkodzenie ślimaka ogranicza też wykorzystanie informacji pochodzących z różnicy położeń źródła sygnału i maskera, co także utrudnia komunikację słowną (por. pkt 5).

* * *

Tak jak poznanie mechanizmu działania ślimaka jest kluczem do zrozumienia procesu słyszenia, tak analiza percepcyjnych konsekwencji uszkodzenia ślimaka jest reprezentatywna dla patologicznej obróbki sygnału w układzie słuchowym. Analiza ta jest niezwykle istotna w poszukiwaniu rozwiązań problemów osób z głuchotą odbiorczą, dla których brak zrozumiałości mowy na tle szumu jest najbardziej dokuczliwy w życiu codziennym. Aparaty słuchowe powinny skutecznie kompensować jak największą liczbę skutków zniszczenia ślimaka. Badania psychoakustyczne znajdują wtedy spożytkowanie o wartości trudnej do przecenienia.

Warto jeszcze raz podkreślić, że generalną cechą percepcyjnych konsekwencji uszkodzenia ślimaka jest ich znaczne międzyosobnicze różnicowanie. Oprócz — wspomnianego na początku artykułu — pewnego nienadążania psychoakustyki za fizjologią słyszenia różnicowanie to komplikuje formułowanie prawdopodobnych hipotez percepcyjnych.

Bibliografia

- Buus S., Florentine M., Redden R. B., 1982: The SISI test. A review. „Audiology” 21, 273-293, 365-385.
- Glasberg B. R., Moore B. C. J., 1986: Auditory filter shapes in subjects with unilateral and bilateral cochlear impairments. „J. Acoust. Soc. Am.” 79, 1020-1033.
- Häusler R., Colburn H. S., Marr E., 1983: Sound localization in subjects with impaired hearing. „Acta Otolaryngol.” Suppl. 400, 1-62.
- Lüscher E., Zwislocki J. J., 1949: A simple method for indirect determination of the recruitment phenomenon. „Acta Otolaryngol.” Suppl. 78, 156-168.
- Moore B. C. J., 1989: An introduction to the psychology of hearing. Ed. 3, Londyn.
- Moore B. C. J., 1995: Perceptual consequences of cochlear damage, Oxford.
- Moore B. C. J., Peters R. W., 1992: Pitch discrimination and phase sensitivity in young and elderly subjects and its relation to frequency selectivity. „J. Acoust. Soc. Am.” 91, 2881-2889.
- Ruggero M. A., Rich N. C., 1987: Timing of spike initiation in cochlear afferents. „J. Neurophysiol.” 58, 379-403.
- Ruggero M. A., Rich N. C., Recio A., 1993: Alteration of basilar membrane response to sound by acoustic overstimulation. In: Biophysics of hair cell sensory systems. Ed. H. Duifhuis [et al.], Signapur 258-265.
- Scharf B., 1992: Recent measurements of loudness adaptation and the definition of loudness. „Mat. ICA” 1-5.