

Elżbieta Szela¹, Joanna Szuchnik², Magdalena Kanabus¹,
Iwona Kołodziejczyk¹, Lech Śliwa², Andrzej Senderski²,
Adam Walkowiak²

¹ Pracownia Neuropsychologii Instytutu Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN, Warszawa
² Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

Neuropsychologiczne podłoże wznawiania funkcji rozumienia mowy u pacjentów po wszczepieniu implantów ślimakowych

Neuropsychological basis of auditory comprehension restitution
in cochlear implant users

Słowa kluczowe: percepcja czasu, implanty ślimakowe, rozumienie mowy.
Key words: time perception, cochlear implants, auditory comprehension.

Streszczenie

Badania dotyczyły neuropsychologicznego podłoża wznawiania rozumienia mowy u pacjentów dorosłych, którzy z różnych przyczyn w okresie postlingwalnym utracili całkowicie słuch, przez pewien czas żyli w „świecie ciszy”, a następnie odzyskali zdolność słyszenia dzięki wszczepieniu implantu ślimakowego. Celem pięciu eksperymentów było poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, dlaczego po wspomnianej operacji, mimo zastosowania podobnego treningu słuchowego w toku dwuletniej terapii logopedycznej, u jednych pacjentów uzyskuje się dobre efekty w zakresie wznawiania rozumienia mowy, u innych zaś nie są one zadowalające. Eksperymenty koncentrowały się na percepcji czasu, która – jak wykazały wcześniejsze badania – leży u podłoża odbioru i nadawania mowy. Przedmiotem badań było poznanie zakresów działania trzech podstawowych mechanizmów, kontrolujących postrzeganie kolejności zdarzeń (eksperyment 1), integrację informacji (eksperyment 2 i 3) oraz sekwencyjne akty ruchowe (eksperyment 4 i 5).

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd dotychczasowych badań w tym zakresie, cele poszczególnych eksperymentów, charakterystykę badanych osób oraz zastosowane procedury. W następnym artykule w tym tomie przedstawione są opisy uzyskanych wyników oraz ich dyskusja.

Summary

The experiments concerned with neuropsychological basis of auditory comprehension restitution in post-lingually deafened adults after cochlear implantation. Five experiments aimed to answer the question why after the similar auditory training during the two year speech therapy some of these patients displayed poor auditory comprehension, whereas the other ones showed the relatively good level of this ability. As the existing literature shows the close association between timing and language, the experiments were focused on time perception and concentrated on temporal domains of 3 basic mechanisms that control temporal order of events (experiment 1), integration of information (experiment 2 and 3) and sequential motor acts (experiment 4 and 5).

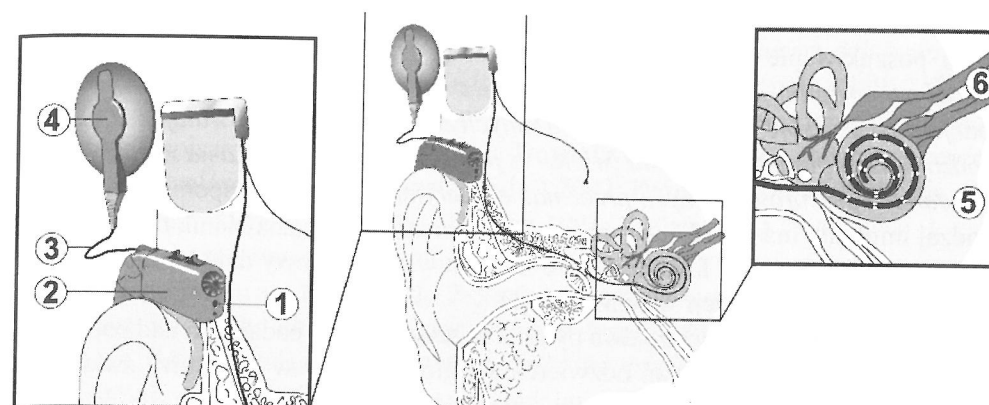
The present paper contains the literature review, descriptions of experimental aims, subjects and applied procedures. The next paper in this volume presents the achieved results and discussion of the observed relationships.

I. WSTĘP

1. Wprowadzenie

Zastosowanie implantów ślimakowych w leczeniu całkowitej głuchoty oraz głębokiego niedosłuchu jest jednym z największych osiągnięć medycyny i techniki w ostatnich dziesięcioleciach. System implantu jest elektroniczną protezą słuchu, której działanie polega na bezpośredniej, elektrycznej stymulacji zakończeń nerwu słuchowego. Dzięki jej zastosowaniu możliwe jest przywrócenie zdolności słyszenia nawet w tych przypadkach, gdy komórki słuchowe uległy bardzo poważnemu uszkodzeniu lub całkowitemu zniszczeniu. System implantu ślimakowego (rys. 1) zawiera część wszczepialną, z zespołem elektrod wprowadzanych do schodów bębienka w ślimaku, oraz część zewnętrzną, której najważniejszym elementem jest procesor sygnałowy, określany jako procesor mowy. Informacja zawarta w sygnałach akustycznych jest przetwarzana na sygnały elektryczne, odpowiednio kodowana i przesyłana do ślimaka w postaci elektrycznych sygnałów stymulujących. W zależności od systemu implantu i przyjętej strategii kodowania sygnały te mogą być ciągami impulsów lub odpowiednio ukształtowanymi ciągłymi przebiegami prądu.

Ze względu na sposób stymulacji elektrycznej systemy implantów ślimakowych można generalnie podzielić na jednokanałowe, w których sygnały stymulujące są dostarczane za pośrednictwem pojedynczej elektrody, oraz wielokanałowe, gdzie stymulowane są jednocześnie różne zakończenia nerwu słuchowego poprzez wiele elektrod, rozmieszczonych wzdłuż błony podstawnej. Pierwszy rodzaj systemów jest historycznie starszy, w chwili obecnej praktycznie nie stosowany, jest jednak wciąż używany przez wielu pacjentów operowanych w latach osiemdziesiątych i wczesnych latach dziewięćdziesiątych.



Rys. 1. Schemat systemu implantu ślimakowego: 1 – mikrofon, 2 – procesor mowy, 3 – kabel nadajnika, 4 – nadajnik z cewką antenową, 5 – zespół elektrod w schodach bębienka ślimaka, 6 – nerw słuchowy (dzięki uprzejmości MED-EL Co.)

Wprowadzenie implantów wielokanałowych wniosło rewolucyjną poprawę percepcji mowy u pacjentów po takiej operacji. Był to wynik faktu, że w systemach wielokanałowych stało się możliwe znacznie doskonalsze przekazywanie informacji o parametrach częstotliwościowych i czasowych sygnału mowy (i innych sygnałów akustycznych). Ma to związek z wykorzystaniem specjalnych strategii kodowania i dostosowaniem sposobu stymulacji do organizacji tonotopowej ślimaka, tzn. uwzględnieniem związku między położeniem zakończeń nerwu słuchowego w ślimaku a częstotliwością sygnału wywołującego ich najsilniejszą reakcję.

Bardzo ważną częścią programu leczenia głuchoty za pomocą implantów ślimakowych jest pooperacyjna rehabilitacja. Polega ona na trudnym i niekiedy długotrwałym procesie uczenia różnicowania i rozpoznawania odbieranych wrażeń słuchowych, w tym również dźwięków mowy. Przebieg rehabilitacji zależy od wielu czynników, a jej ostatecznego efektu nie zawsze można przewidzieć.

Niniejsze badania zrealizowane zostały w Pracowni Neuropsychologii IBD PAN we współpracy z Instytutem Fizjologii i Patologii Słuchu. Część eksperymentalna realizowana była w kooperacji z Institut für Medizinische Psychologie z Monachium, z którym prowadzimy współpracę naukową.

2. Cele badawcze

Przeprowadzone badania koncentrowały się na neuropsychologicznych mechanizmach leżących u podłoża wznawiania funkcji rozumienia mowy dźwiękowej u pacjentów dorosłych, którzy z różnych przyczyn w okresie postlingwalnym utracili całkowicie słuch, przez pewien czas żyli w „świecie ciszy”, a następnie

odzyskali zdolność słyszenia dzięki wspomnianej operacji. Celem eksperymentów było poszukiwanie odpowiedzi na pytania: (1) *dlaczego pomimo zastosowania podobnej terapii logopedycznej w zakresie wznawiania rozumienia mowy u jednych pacjentów uzyskuje się dobre efekty, u innych zaś nie są one zadowalające?* (2) *czy rodzaj wszczepionego implantu (wielo- vs jednokanałowy) wpływa na wyniki obserwowane w przeprowadzonych przez nas eksperymentach?* Jak wspomniano wyżej, rodzaj implantu ma zasadnicze znaczenie dla możliwości wznawiania funkcji rozumienia mowy. Znanym faktem jest, że implant wielokanałowy daje lepsze rokowania odnośnie do restytucji w tym zakresie.

Odpowiedzi na powyższe dwa pytania poszukiwano w badaniach nad percepcją czasu. Taka linia poszukiwań odzwierciedla główne nurty w literaturze światowej na temat neuropsychologicznej bazy mowy człowieka [np. Hellige 1993; Efron 1990].

3. Mechanizmy kształtujące percepcję czasu

Przeprowadzone badania koncentrowały się na poznaniu zakresów, w których operują trzy podstawowe hipotetyczne mechanizmy odpowiedzialne za percepcję czasu: (1) *mechanizm rozpoznawania kolejności zdarzeń* (typowy zakres operowania 30-40 milisekund); (2) *mechanizm integracyjny* (zakres 2-3 sekund) oraz (3) *mechanizm działający na poziomie pośrednim pomiędzy dwoma wymienionymi, który kształtuje sekwencyjne procesy ruchowe* (zakres 200-400 milisekund). Poniżej przedstawimy krótką charakterystykę każdego z wymienionych mechanizmów.

Przy sukcesywnej ekspozycji dwóch bodźców określenie, który jest pierwszy, a który drugi, jest możliwe wtedy, gdy przerwa między nimi jest dłuższa niż ok. 30 milisekund. Dopiero po przekroczeniu tej granicy bodźce stają się samodzielnymi zdarzeniami, które można zidentyfikować, a więc określić ich porządek w czasie. *Mechanizm odpowiedzialny za rozpoznawanie kolejności dwóch bodźców* leży prawdopodobnie u podłoża rozumienia mowy (zwłaszcza słuchu fonematycznego), a jego zakres operowania zbliżony jest do czasu trwania spółgłosek zwartych w płynnej mowie [Merzenich (i in.) 1996; Tallal (i in.) 1996]. Jeśli „zegar milisekundowy” nie funkcjonuje prawidłowo, zaburzona jest percepcja sekwencji głosek w wypowiedziach słownych, co w badaniu klinicznym przejawia się jako zaburzenie słuchu fonematycznego.

Mechanizm integracyjny scala elementarne zdarzenia w większe jednostki. Bez takiego scalania mózg człowieka byłby przeciążony, rejestrując nieustannie zachodzące wokół zmiany. Mechanizm integracyjny leży, jak się wydaje, m.in. u podłoża płynnej mowy. Dotychczasowe badania wykazały, że ma ona ściśle określoną segmentację czasową niezależnie od języka, jakim włada rozmówca. Podobne prawidłowości obserwuje się dla języka polskiego, angielskiego, niemieckiego czy chińskiego, a wypowiadane frazy (czyli logiczne ciągi słów),

trwające mniej więcej kilka sekund, są oddzielane krótkimi pauzami [Pöppel 1989; 1998; Szelać 1999]. Istnieją również dowody eksperymentalne na działanie mechanizmu integracyjnego (przeglądowe zestawienie: Pöppel 1989; 1998). W niniejszym artykule przytoczymy tylko te dwa z nich, które znalazły zastosowanie w opisanych poniżej badaniach. Dowody te pochodzą z badań nad reprodukcją interwałów czasowych [Szelać (i in.) 2002; Kargerer (i in.) 2002] oraz nad integrowaniem uderzeń metronomu [Szelać 1997; Szelać (i in.) 1996].

W dotychczasowych badaniach wykazano na przykład, że w zadaniu reprodukcji czasu interwały trwające do 2-3 sek są stosunkowo dokładnie odtwarzane, natomiast interwały dłuższe są niedoceniane (reprodukowane jako krótsze niż wzorzec). Można więc ogólnie stwierdzić, że przedział rzędu 2-3 sek jest „szczególnie uprzywilejowany”, prawdopodobnie dlatego, iż w takich ramach czasowych „działa” mózg człowieka w wyniku operowania *mechanizmu integracyjnego*. Do podobnego wniosku upoważniają badania dotyczące scalania w większe grupy dźwięków generowanych przez metronom. W jednostajnym ciągu jego uderzeń dosłuchać się można pewnego subiektywnego rytmu poprzez akcentowanie w myślach co drugiego, trzeciego czy *n*-tego uderzenia. Okazuje się, że mnożąc liczbę uderzeń (które badany połączył w grupę) przez czas pomiędzy dwoma kolejnymi uderzeniami (zależy on od zastosowanej częstotliwości uderzeń metronomu), można obliczyć interwał, w którym możliwe jest integrowanie dźwięków. Nasze wcześniejsze badania wykazały, że u większości ludzi bez uszkodzeń układu nerwowego interwał ten w zasadzie nie przekracza 3 sek [Szelać 1997; Szelać (i in.) 1996; 1998]. Na tej podstawie można wnioskować, że możliwość integracji informacji jest ograniczona w czasie do kilku sekund poprzez działanie powyższego mechanizmu.

Warto dodać, że zgodnie z teorią Pöppela przedział kilku sekund odpowiada za tzw. subiektywne przeżywanie przez nas teraźniejszości. A więc to, co nasze zmysły rejestrują jako „teraz”, trwa ok. 2-3 sek i jest wyznaczone zdolnością integrowania informacji ograniczoną w czasie zazwyczaj do około kilku sekund [Pöppel 1989; 1998].

Pomiędzy poziomem głosek (30-40 milisekund) a poziomem fraz (2-3 sekund) operuje prawdopodobnie *mechanizm kontrolujący sekwencyjne procesy ruchowe*, np. ruchy manipulacyjne w obrębie rąk czy też ruchy narządów artykulacyjnych podczas produkowania wypowiedzi słownych. Modelem eksperymentalnym do badania zakresu operowania tego mechanizmu może być m.in. tzw. *tapping*, czyli rytmiczne, powtarzalne naciskania palcem wskazującym na przycisk. Wykazano, że przy naciskaniu w tempie najszybszym jego częstotliwość wynosi zazwyczaj ok. 5 Hz (pięć naciśnieć na sekundę), a w tempie personalnym ok. 2.5 Hz [Wittmann (i in.) 2001]. Te dwa templa naciskania odzwierciedlają dwa sposoby kontroli wykonywania sekwencyjnych, powtarzalnych ruchów. W tempie najszybszym jest

ona automatyczna, natomiast w tempie personalnym odbywa się ona poprzez informację zwrotną dotyczącą wykonania każdego pojedynczego naciśnięcia. Mechanizm regulujący sekwencyjne procesy ruchowe leży również u podstaw werbalnego porozumiewania się w zakresie recepcji oraz ekspresji sylab i działa w ramach ok. 200-400 milisekund, co odpowiada trwaniu przeciętnej sylaby w mowie płynnej [Tallal (i in.) 1996].

Należy zaznaczyć, że u osób bez uszkodzeń układu nerwowego zakresy działania wymienionych mechanizmów są w zasadzie niezależne od modalności eksponowanych wzorców – te same relacje obserwuje się dla wzroku, słuchu czy dotyku, a także pewnych aspektów zachowań ruchowych człowieka. Wskazuje to na fakt, że każdy z wymienionych mechanizmów sterowany jest przez centralny proces, niezależny od analizatora opracowującego informację o bodźcach zmysłowych [Pöppel 1998; Kanabus (i in.) 2002].

4. Krótki przegląd dotychczasowych badań nad percepcją czasu u osób z zaburzeniami mowy

W wielu dotychczasowych badaniach (również prowadzonych w Pracowni Neuropsychologii [Szelać 1997; 1999; 2003] wykazano, że u podłoża zarówno odbioru (rozumienia), jak i nadawania (ekspresji) mowy leżą specyficzne mechanizmy związane z percepcją czasu. Wniosek ten znajduje uzasadnienie w prostej obserwacji wskazującej, że mowa człowieka to proces przebiegający w czasie. Sprawność językowa łączy się zatem nierozdzielnie z odpowiednią strukturą czasową poszczególnych elementów wypowiedzi słownych: głosek, sylab, fraz. Zaburzenie tej struktury na poziomie bądź recepcji, bądź ekspresji powoduje poważne trudności w porozumiewaniu się. W toku naszej wieloletniej współpracy z Ernstem Pöppelem z Monachium – klasykiem badań nad percepcją czasu i twórcą teorii jego przeżywania przez umysł człowieka [Pöppel 1989; 1998] – wykazaliśmy, że u pacjentów z nabytymi jednostronnymi ogniskowymi uszkodzeniami mózgu występuje ścisły związek defektów językowego porozumiewania się z zaburzeniami funkcjonowania specyficznych mechanizmów kształtujących percepcję czasu. Mechanizmy te mają różnorodny zakres działania: milisekundowy, sekundowy [Steinbüchel (i in.) 1999 a]. Na przykład pacjenci z lezjami w obszarze 22 według Brodmana i objawami afazji Wernickego wykazywali trudności w wykonaniu zadania dotyczącego poziomu kilkudziesięciu milisekund [Steinbüchel (i in.) 1999 b]. Natomiast pacjenci z objawami afazji Broca i lezją obejmującą pole 44 przejawiali zaburzenia w zadaniu dotyczącym poziomu kilku sekund [Szelać (i in.) 1997]. Ogólnie biorąc, wymienione deficyty w funkcjonowaniu pacjentów z afazją łączymy z ich trudnościami w sferze językowej, tj. zaburzonym słuchem fonematycznym (poziom kilkudziesięciu milisekund) w przypadku afazji Wernickego lub tzw. stylem telegraficznym i zredukowaną długością frazy (poziom

kilku sekund) w przypadku afazji Broca. Warto również dodać, że wszyscy pacjenci z afazją, niezależnie od jej rodzaju i lokalizacji uszkodzenia mózgu, mieli trudności w wykonaniu zadania dotyczącego poziomu kilkuset milisekund, czyli poziomu sylab [Wittmann (i in.) 2001]. A zatem nasze wcześniejsze badania z udziałem pacjentów z nabytymi ogniskowymi uszkodzeniami mózgu wykazały, że wymienione trzy mechanizmy kształtujące percepcję czasu są reprezentowane w „klasycznych” obszarach mowy, a pacjenci z afazją wykazywali wybiórcze zaburzenia działania tych mechanizmów w zależności od lokalizacji uszkodzenia mózgu i rodzaju afazji [Szelać 2000; 2003; Szelać, Pöppel 2000; Steinbüchel (i in.) 1999 b].

Wyniki naszych badań znalazły potwierdzenie w pracach innych autorów z wiodących laboratoriów na świecie, m.in. w powszechnie znanych odkryciach Pauli Tallal i Michela Merzenicha [Tallal (i in.) 1996; Merzenich (i in.) 1996]. Autorzy ci w sposób jednoznaczny wykazali, że wielu zaburzeniom językowego porozumiewania się u dzieci i dorosłych (np. opóźnionemu rozwojowi mowy, dyslalii, afazji, dysleksji) towarzyszą zaburzenia w percepcji czasu. Ważnym odkryciem naukowym z ostatnich lat jest wykazanie poprawy w funkcjach recepcji i ekspresji mowy w wyniku zastosowania treningu w czasowym opracowywaniu informacji, wspomagającego klasyczną terapię logopedyczną w przypadku dzieci z opóźnionym rozwojem mowy.

Należy również zaznaczyć, że w literaturze brak jest danych na temat percepcji czasu w zakresie opisanych wyżej mechanizmów u ludzi, którym przywrócono słuch w wyniku wszczepienia implantu ślimakowego. Jedyne doniesienia na temat percepcji czasu w tej grupie osób dotyczą badania tzw. fuzji brzęku, czyli wyznaczenia najkrótszej przerwy pomiędzy dwoma prezentowanymi sukcesywnie bodźcami słuchowymi, potrzebnej badanemu do stwierdzenia, czy prezentowano jeden bodziec, czy też dwa odrębne bodźce. Z dotychczasowych badań wynika, że w przypadku osób z nie uszkodzonym mózgiem wynosi ona dla zmysłu słuchu zazwyczaj kilka milisekund. Przy przerwie krótszej niż wymieniona, choć prezentowane są dwa odrębne bodźce, człowiek słyszy je jako jednoczesne. Zagadnienia te nie są przedmiotem eksperymentów prezentowanych w niniejszym artykule, gdyż zgodnie z badaniami przytoczonymi przez Pöppela (1989; 1998) procesy fuzji mają charakter modalnie specyficzny, zachodzą niezależnie w poszczególnych narządach zmysłów, nie są więc kształtowane przez wspólny mechanizm mózgowy, niezależny od analizatora opracowującego informację.

5. Założenia badawcze i cele poszczególnych eksperymentów

W pięciu przeprowadzonych eksperymentach poszukiwano odpowiedzi na pytanie: *czy zaburzona jest percepcja czasu u pacjentów przejawiających trudności we wznawianiu rozumienia mowy po wszczepieniu implantu?* Eksperymenty te

koncentrowały się na poziomie niewerbalnym, „przedjęzykowym” i miały na celu dostarczenie informacji o funkcjonowaniu pacjenta w czasowym opracowywaniu informacji na poziomie głosek, sylab i fraz.

Celem *eksperymentu 1* było poznanie zakresów operowania mechanizmu rozpoznawania kolejności zdarzeń. Przedmiotem badań było oszacowanie najkrótszej przerwy między dwoma sukcesywnie zaprezentowanymi bodźcami (wzrokowymi lub słuchowymi), niezbędnej do poprawnego podania ich kolejności. Celem *eksperymentów 2 i 3* było poznanie zakresu operowania mechanizmu integracyjnego. W *eksperymentach 2 i 3* badano dokładność reprodukcji interwałów o różnorodnym czasie trwania. Przedmiotem szczególnego zainteresowania była dokładność reprodukcji tych wzorców, których czas trwania odpowiadał ramom badanego mechanizmu integracyjnego, czyli 2-3 sek. Celem *eksperymentu 3* było zbadanie maksymalnego zakresu zdolności integracji informacji w zadaniu scalania uderzeń generowanych przez metronom. Z kolei dwa ostatnie *eksperymenty (4 i 5)* zaplanowano w celu poznania specyfiki mechanizmu kontrolującego sekwencyjne procesy ruchowe. Modelem do badania tych procesów był wymieniony wyżej *tapping*, stanowiący m.in. integralną część baterii Halsteda-Reytana do diagnozy neuropsychologicznej pacjentów z uszkodzonym mózgiem. Celem tych dwóch eksperymentów było porównanie pomiędzy *tappingiem* wykonywanym w tempie najszybszym (eksperyment 4) i dogodnym dla osoby badanej, czyli tzw. *personalnym* (eksperyment 5).

II. METODA

1. Osoby badane

W przeprowadzonych eksperymentach przebadano trzy grupy osób. Dwie pierwsze składały się z pacjentów dorosłych, którzy na różnym etapie swojego życia utracili słuch, żyli „w świecie cizy” przez okres od trzech miesięcy do nawet dwudziestu lat, a następnie odzyskali zdolność słyszenia w wyniku wszczepienia wielo- lub jednokanałowego implantu ślimakowego. Po takiej operacji pacjenci przez okres co najmniej dwóch lat uczestniczyli w intensywnym treningu słuchowym w trakcie terapii logopedycznej.

Do grupy I zakwalifikowane zostały osoby z implantem wielokanałowym (MED-EL Combi 40+ i Combi 40), a do grupy II z implantem jednokanałowym (MED-EL Comfort). W tab. 1 i 2 przedstawione są zbiorcze zestawienia informacji o pacjentach z grupy I i II, zakwalifikowanych do badań.

Tab. 1. Zbiorcze zestawienie informacji o pacjentach z implantami wielokanałowymi zakwalifikowanymi do badań eksperymentalnych

Nr	Płeć, wiek (lata)	Wynik testu Ravena (centyle)	Czas przebywania w „świecie cizy”	Etiologia głuchoty	Czas używania implantu (lata)	Rozumienie mowy – średnia z 6 podtestów (%)
1	K (52)	84	7 miesięcy	Autoimmunologiczna (?)	3	93
2	K (54)	79	9 lat	Leki ototoksyczne	6	92
3	K (50)	99	2 lata	Szkarlatyna	5	79
4	K (34)	98	14 lat	Zapalenie opon mózgowych	9	84
5	K (31)	99	16 lat	Świnka/dyfteryt	6	63
6	K (26)	75	5 lat	Leki ototoksyczne	6	85
7	K (55)	58	?	Zapalenie ucha środkowego	2	64
8	K (56)	86	3 lata	Zapalenie ucha środkowego	3	86
9	M (41)	98	2 lata	Otoskleroza	2	93
10	M (22)	97	6 lat	Zapalenie opon mózgowych	7	90
11	M (58)	94	20 lat	Otoskleroza	8	86
12	M (41)	82	14 lat	Zapalenie opon mózgowych	4	89
13	M (37)	72	20 lat	Odra	2	79
14	M (31)	56	8 lat	Świnka	8	91
15	M (40)	84	3 miesiące	Leki ototoksyczne	6	83
16	M (17)	90	7 lat	Zapalenie opon mózgowych	4	98
17	M (57)	28	3 lata	Zapalenie opon mózgowych	3	66

Wszyscy pacjenci spełniali następujące kryteria:

- regularne używanie implantu;
- praworęczność (oszacowywana na podstawie *The Edinburgh Handedness Inventory*, Oldfield 1971);
- zweryfikowane i uaktualnione ustawienie procesora implantu zapewniające optymalne funkcjonowanie systemu; charakterystyki skalowania głośności w wolnym polu akustycznym nie wykazujące istotnych odstępstw w stosunku do typowych dla osób implantowanych;
- prawidłowa ostrość wzroku badana za pomocą tablicy Snellena (w przypadku wady wzroku warunkiem zakwalifikowania osoby do badań były prawidłowo dobrane okulary), a także brak oznak daltonizmu [Velhagen, Broschmann 1997];
- wskaźnik inteligencji w granicach lub powyżej normy (powyżej 25 centyla, Test Matryc Ravena, wersja Standard);
- brak (poza głuchotą) innych chorób układu nerwowego oraz urazów głowy*;

* W przypadku pacjentów, którzy utracili słuch w wyniku zapalenia opon mózgowych lub przebytych urazów głowy, warunkiem zakwalifikowania do eksperymentów było badanie neurologiczne w normie.

- nieprzyjmowanie w ostatnim okresie leków wpływających na układ nerwowy;
- brak w przeszłości złamań w obrębie rąk.

Tab. 2. Zbiorcze zestawienie informacji o pacjentach z implantami jednokanałowymi zakwalifikowanymi do badań eksperymentalnych

Nr	Płeć, wiek (lata)	Wynik testu Ravena (centyle)	Etiologia głuchoty	Czas przebywania w „świecie ciszy”	Czas używania implantu (lata)	Rozumienie mowy – średnia z 6 podtestów (%)
1	K (59)	94	Otoskleroza	14 lat	6	50
2	K (54)	84	Zapalenie ucha środkowego	8 lat	6	52
3	K (49)	27	Zapalenie ucha środkowego	1 rok	8	39
4	K (45)	91	Uraz	2 lata	7	44
5	K (26)	99	Autoimmunologiczna	2 lata	8	75
6	M (61)	99	Grypa	14 lat	8	45
7	M (44)	84	Zapalenie opon mózgowych	1 rok	8	69
8	M (20)	48	Zapalenie opon mózgowych	3 lata	4	26
9	M (34)	27	Zapalenie opon mózgowych (uraz)	7 lat	8	11
10	M (66)	94	Zapalenie opon mózgowych	12 lat	4	68
11	M (61)	86	Zapalenie opon mózgowych	8 miesięcy	8	44
12	M (66)	46	Grypa	11 miesięcy	8	23

Wyniki prowadzonego z pacjentami treningu słuchowego oceniane były na podstawie baterii testów percepcyjnych dla dorosłych, powstałej w Instytucie Fizjologii i Patologii Słuchu na kanwie zestawu polecanego przez firmę MED-EL. Zestaw ten składa się z 5 następujących podtestów:

1. Identyfikacja samogłosek języka polskiego w sylabach (badanie obejmuje trzy listy sylab, w każdej z nich testuje się po 8 samogłosek występujących pomiędzy dwoma spółgłoskami „b”);
2. Identyfikacja spółgłosek w sylabach (badanie obejmuje trzy listy, w każdej z nich testuje się po 16 spółgłosek występujących pomiędzy dwoma samogłoskami „a”);
3. Identyfikacja liczb w zakresie od 1 do 100. Umiejętności badanej osoby ocenia się na podstawie czterech list, z których każda zawiera po 10 liczb. Pacjent jest poinformowany, że będzie słuchał liczb mniejszych od 100. Dwie pierwsze listy czyta się głosem o normalnym natężeniu (ok. 60 dB), a pozostałe głosem donośniejszym (ok. 80 dB);

4. Rozumienie słów jednosylabowych (postępy w rehabilitacji słuchu ocenia się na podstawie wyników uzyskanych w trzech listach, z których każda zawiera po 20 słów w zestawie otwartym);

6. Rozumienie zdań w zestawie otwartym. Cały test zdaniowy zawiera w sumie 160 zdań używanych w codziennym życiu, które umieszczone są na 16 listach (po 10 zdań na każdej z nich). Każda lista zawiera w sumie 53 wyrazy. W badaniu wykorzystuje się trzy listy. Przed rozpoczęciem właściwego badania jedna z pozostałych list używana jest do ćwiczeń wprowadzających. Wskaźnikiem rozumienia zdań jest procent słów zrozumianych na drodze słuchowej.

Do oszacowywania kompetencji językowej pacjenta w niniejszych badaniach dołączono „Test słuchowego różnicowania głosek” (TSRG) [Nowak-Czerwińska 1994]. Składa się on z 64 par wyrazów, prezentowanych w ośmiu seriach po osiem par. Wyrazy zastosowane w celu oszacowania poszczególnych opozycji fonetycznych w każdej serii różnią się między sobą tylko jedną cechą dystynktywną (tzn. dźwięczność – bezdźwięczność, ustność – nosowość, twardość – miękkość, sposób artykulacji, czyli stopień zbliżenia narządów mowy, oraz miejsce artykulacji). W każdej z ośmiu serii oprócz sześciu par wyrazów różnych występowały dwie pary wyrazów jednakowych. Badany, który ma kłopoty z postrzeganiem różnic między głoskami, tzn. z rozpoznawaniem danej opozycji, napotyka zatem podobne trudności podczas oceniania par niejednakowych i jednakowych. Jego zadaniem w przypadku każdej testowanej pary słów jest określenie, czy oba słowa były takie same, czy różne, poprzez udzielenie odpowiedzi „tak” lub „nie”.

Wyniki uzyskane w wymienionych podtestach przez pacjentów z implantami wielo- i jednokanałowymi zakwalifikowanymi do niniejszych badań zostały przedstawione w tab. 3.

Tab. 3. Średnie wyniki uzyskane w badaniu logopedycznym przez pacjentów z implantami ślimakowymi jedno- i wielokanałowymi

Rodzaj testu	Średni wynik uzyskany przez pacjentów z implantami	
	jednokanałowymi	wielokanałowymi
Test słuchowego różnicowania głosek	70,5%	85,5%
Identyfikacja samogłosek	43%	92,4%
Identyfikacja spółgłosek	31,3%	66,3%
Identyfikacja liczb (od 1 do 100)	77,3%	100%
Rozumienie słów jednosylabowych	15,9%	66,5%
Rozumienie zdań – zestaw otwarty	35%	91,2%

Grupę trzecią (kontrolną) stanowiły osoby o prawidłowym słuchu i wzroku, również praworęczne, nie mające wad mowy i uszkodzeń układu nerwowego. Do każdego pacjenta zakwalifikowanego do grupy I lub II dobrano odpowiednią osobę kontrolną tej samej płci, o zbliżonym wieku (± 4 lata) oraz wykształceniu. Grupa kontrolna składała się ogółem z 29 osób.

2. Procedura eksperymentalna

2.1. Prezentacja bodźców słuchowych

W badaniach eksperymentalnych pacjentów z implantami ślimakowymi możliwe jest zastosowanie dwóch sposobów prezentacji bodźców słuchowych, które stosuje się w celu określenia reakcji pacjenta w przeprowadzonych testach neuropsychologicznych:

1) jako dźwięków w wolnym polu akustycznym lub jako sygnałów elektrycznych dostarczanych do analogowego wejścia procesora z pominięciem mikrofonu;

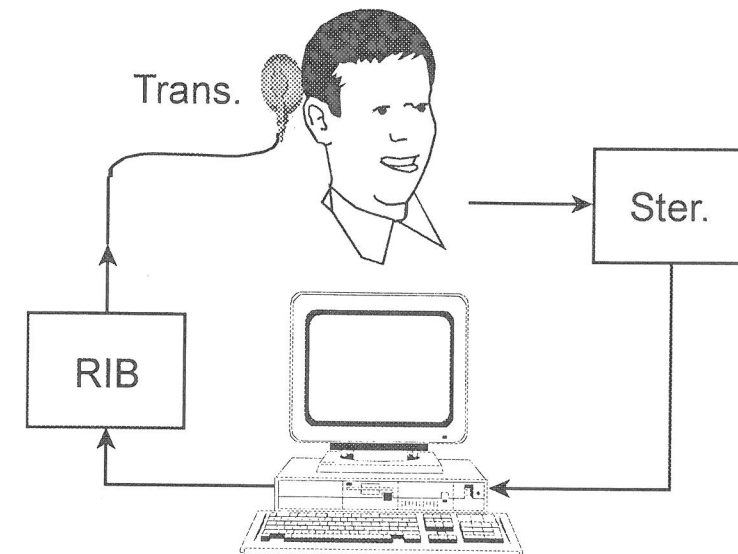
2) jako sygnałów stymulujących bezpośrednio system implantu – sygnałom tym nadaje się taką postać, jaka byłaby generowana przez „idealny” procesor implantu w odpowiedzi na bodźce akustyczne o założonym kształcie.

Pierwszy sposób jest prostszy w realizacji, gdyż nie wymaga ingerencji w system implantu. Zaletą jego jest fakt, że stymulacja bodźcami dźwiękowymi w eksperymencie odpowiada słyszeniu w warunkach dnia codziennego. Natomiast wadą tego sposobu stymulacji jest brak kontroli nad ostateczną postacią sygnałów stymulujących nerw słuchowy. Ze względu na specyfikę zastosowanego procesora mowy sytuacja taka może mieć miejsce zwłaszcza w przypadku implantów wielokanałowych. Wówczas sygnał akustyczny przechodzi skomplikowany proces przetwarzania, szereg operacji ma charakter nieliniowy, a odpowiedzi w stanach nieustalonych nie są do końca znane. Zależności czasowe i częstotliwościowe bodźców mogą być w wyniku tego zaburzone, co prowadzić może do mniejszej precyzji pomiarów w poszczególnych eksperymentach.

Drugi sposób prezentacji bodźców słuchowych jest trudny do realizacji, gdyż bezpośrednio programowanie procesora implantu jest skomplikowane i wymaga zastosowania specjalnych narzędzi, które są dostępne jedynie w laboratoriach producenta systemu. Z drugiej jednak strony zastosowanie metody programowania bezpośredniego gwarantuje pełną kontrolę nad charakterystykami sygnałów stymulujących, wierną reprezentację ich zależności czasowych i parametrów częstotliwościowych.

Z wymienionych względów w przeprowadzonych badaniach zastosowano oba sposoby prezentacji bodźców. W przypadku pacjentów z implantami jednokanałowymi (analogowe wejście procesora) prezentowano bodźce wyłącznie w wolnym

polu akustycznym, natomiast w badaniach pacjentów z implantami wielokanałowymi zarówno ekspozycję w wolnym polu, jak i bezpośrednią stymulację elektrod implantu [Walkowiak, Śliwa 2003, zamieszczony w tym tomie „Audiofonologii”). Dzięki współpracy naukowej Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu z producentem systemów implantów ślimakowych, firmą Med-El, uzyskano dostęp do narzędzi badawczych i autoryzację ich wykorzystania w eksperymentach z pacjentami używającymi takich implantów. Schemat stanowiska pomiarowego do badań neuropsychologicznych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego w badaniach reakcji pacjenta z implantem na bodźce słuchowe (objaśnienia: Ster. – sterownik klawiszowy, RIB – programowalny interfejs pomiarowy, Trans. – nadajnik implantu z cewką antenową)

Wykorzystano w nim programowalny interfejs pomiarowy (*Research Interface Box* – RIB), realizujący funkcję procesora w systemie implantu, którego działanie jest programowalne na poziomie kodu procesora. Ze względu na nietypowy sposób programowania utworzono specjalne kody umożliwiające generację bodźców o ściśle sprecyzowanym przebiegu. Oznacza to stymulację za pośrednictwem odpowiedniej elektrody (lub grup elektrod) implantu, w odpowiednich przedziałach czasowych i odpowiedniej sekwencji czasowej, z właściwymi parametrami prądów stymulujących. Te ostatnie są dobierane indywidualnie dla każdej elektrody i dla każdego pacjenta na podstawie tzw. map ustawienia procesora, znanych z wcześniejszych naszych badań.

Kody procesora są tworzone jako skrypty w środowisku Matlab, a po kompilacji przesyłane łączem szeregowym do pamięci procesora interfejsu RIB. Ograniczona pojemność pamięci tego procesora narzuca pewne ograniczenia na

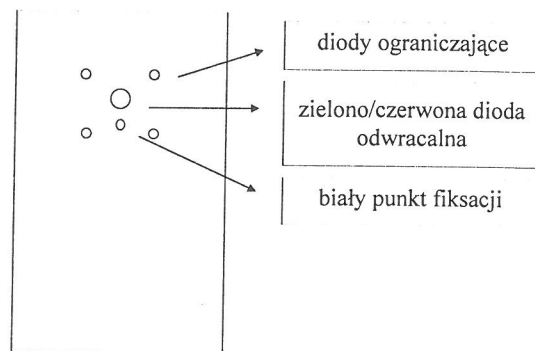
rodzaj i rozmiar generowanych bodźców, lecz dzięki zastosowaniu odpowiednich procedur spełniono praktycznie wszystkie wymagania niniejszych eksperymentów neuropsychologicznych. Program sterujący interfejsem RIB był kontrolowany przez program nadrzędny eksperymentu, sterujący m.in. akwizycją danych (reakcje pacjenta), wizualizacją i gromadzeniem wyników.

Rodzaj zastosowanych sygnałów stymulujących zależał od specyfiki eksperymentu neuropsychologicznego. W eksperymencie 1, dotyczącym progu postrzegania kolejności zdarzeń, generowane były kolejno dwa bodźce (ciągi impulsów bifazowych), pojawiające się na elektrodach implantu odpowiedzialnych za odbiór częstotliwości 300 Hz i 3000 Hz. Odstęp pomiędzy bodźcami był parametrem programowanym. Amplitudę impulsów stymulujących ustalano na odpowiednich poziomach komfortowej głośności (MCL), przez pozostałe zaś elektrody podawana była w tym czasie stymulacja na poziomie progu słyszenia (THR) – jak w poprzednim przypadku. Odpowiada to warunkom „idealnej” stymulacji w odpowiedzi na sekwencję dwu tonów, o dwu różnych częstotliwościach, bramkowanych idealnymi impulsami prostokątnymi.

W eksperymencie 2, dotyczącym reprodukcji czasu trwania bodźca, podawano przez jedną z elektrod implantu – odpowiadającą zakresowi 300 Hz – wzorzec o określonym czasie trwania (ciąg impulsów bifazowych), na poziomie MCL. Pozostałe elektrody były stymulowane w tym czasie na poziomie THR. Odpowiadało to warunkom „idealnej” stymulacji w odpowiedzi na tonalny bodziec akustyczny o obwiedni prostokątnej.

2.2. Prezentacja bodźców wzrokowych

W eksperymencie 1 bodźcem wzrokowym było zielone lub czerwone światło, emitowane przez diodę odwracalną o prostokątnej charakterystyce wygaszania i zapalania. Dioda ta była umieszczona na specjalnie skonstruowanej czarnej tabli-



Rys. 3. Tablica zastosowana w badaniu progu postrzegania kolejności zdarzeń w zakresie percepcji wzrokowej

cy (rys. 3), w której górnej części znajdował się prostokąt wyznaczony przez cztery mniejsze pomarańczowe diody ograniczające. Zielono-czerwona dioda umieszczona była w środku tego prostokąta. Nieco poniżej diody znajdował się biały punkt fiksacji wzroku. Badany siedział przed panelem w odległości 126 cm, wówczas wymiary kątowe wynosiły odpowiednio: w przypadku zielono-czerwonej diody, punktu fiksacji oraz odległości od diody do tego punktu – 0.23 stopnia, natomiast w przypadku prostokąta wyznaczonego czterema diodami markującymi – 1.27 stopnia (wysokość) i 1.82 stopnia (długość).

Natomiast w eksperymencie 2 bodźcem wzrokowym był zielony prostokąt (wymiary: 4.3 stopnia – wysokość i 7.4 stopnia – długość), który eksponowano przez określony czas na ekranie monitora komputerowego.

III. OPIS PROCEDUR STOSOWANYCH W KOLEJNYCH EKSPERYMENTACH

1. Eksperyment 1: próg postrzegania kolejności zdarzeń

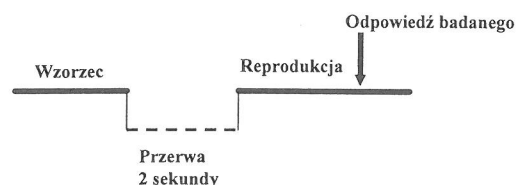
Badane osoby odtwarzały kolejność dwóch sukcesywnie eksponowanych bodźców słuchowych (wyższego i niższego tonu, częstotliwości odpowiednio: 3000 i 300 Hz) albo wzrokowych (zielonej i czerwonej diody – rys. 3). Każdy z wymienionych bodźców słuchowych lub wzrokowych prezentowano przez 15 milisekund. Pomiędzy ekspozycją pierwszego i drugiego bodźca z danej pary występowała przerwa, której długość była zróżnicowana i wynosiła: 10, 20, 40, 60, 80, 120, 150, 300 i 500 milisekund w przypadku pacjentów z implantami wielokanałowymi oraz 10, 20, 40, 80, 150, 300 i 500 milisekund dla pacjentów z implantami jednokanałowymi. Pacjenci podawali kolejność prezentacji dwóch tonów (część słuchowa) lub diod (część wzrokowa). W sytuacji, kiedy badany nie potrafił podać kolejności bodźców, mógł odpowiedzieć, że były one jednoczesne. Analizowano poprawność odpowiedzi uzyskanych w zadaniu słuchowym oraz w zadaniu wzrokowym przy różnych odstępach czasowych między dwoma bodźcami.

Bodźce wzrokowe i słuchowe eksponowano w oddzielnych seriach, każda z nich obejmowała 108 albo 84 próby (patrz wyżej). W przypadku każdej z wymienionych przerw (rozieszczonych w kolejności losowej) zastosowano po 12 powtórzeń. Właściwe badanie poprzedzone było treningiem w różnicowaniu dwóch bodźców oraz rozpoznawaniu ich kolejności przy najdłuższej przerwie.

2. Eksperyment 2: reprodukcja interwałów o określonym czasie trwania

Zadanie polegało na odtwarzaniu długości trwania wzorca wzrokowego (zielonego prostokąta) albo słuchowego (tonu o częstotliwości 300 Hz). Każdy

bodziec eksponowany był przez określony czas wzorcowy, który wynosił 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7 i 9 sekund. Po ekspozycji wzorca następowała dwusekundowa przerwa, po czym pojawiał się on ponownie, tym razem na długi czas. Zadaniem badanego było przerwanie jego trwania poprzez naciśnięcie na przycisk dla wyrażenia decyzji, że prezentacja trwała dokładnie tyle, ile eksponowany uprzednio wzorec. Reprodukowany czas był rejestrowany przez odpowiedni program komputerowy. Schemat procedury eksperymentalnej przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat procedury eksperymentalnej zastosowanej w eksperymencie drugim

Analizowano dokładność reprodukcji poszczególnych wzorców w zadaniu słuchowym oraz wzrokowym. Wzorce wzrokowe i słuchowe eksponowano w oddzielnych seriach; każda z nich obejmowała 77 prób. W przypadku każdego z wymienionych wzorców (rozmieszczonych w kolejności losowej) zastosowano po 7 powtórzeń.

3. Eksperyment 3: integracja uderzeń metronomu

W trakcie eksperymentu badanej osobie prezentowano ciąg jednostajnych uderzeń generowanych przez metronom z częstotliwością: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4. 4.5 i 5 uderzeń na sekundę. Zadaniem było dosłuchanie się w tym jednostajnym ciągu dźwięków subiektywnego rytmu poprzez akcentowanie w myślach co drugiego, trzeciego czy n -tego uderzenia (rys. 5). Badane osoby proszono o podanie, ile dźwięków były w stanie scalić (zintegrować) poprzez własną akcentuację przy danej częstotliwości uderzeń metronomu. Czas integracji odzwierciedlający zakres mechanizmu integracyjnego obliczano mnożąc podaną przez badanego liczbę uderzeń przez interwał między dwoma kolejnymi dźwiękami przy danej częstotliwości uderzeń metronomu.



Rys. 5. Przykład subiektywnego akcentowania co czwartego z prezentowanych dźwięków metronomu – w tej sytuacji badany zeznałby, że połączył w grupę cztery dźwięki

Całe badanie obejmowało 63 próby, a ekspozycję każdej z wymienionych wyżej częstotliwości metronomu (rozmieszczonych w kolejności losowej) powtarzano 7 razy.

4. Eksperyment 4: sukcesywne naciskanie na przycisk (*tapping*) w tempie najszybszym

Zadaniem było sukcesywne naciskanie na przycisk jedną, a następnie drugą ręką w możliwie najszybszym tempie. Specjalnie opracowany program komputerowy rejestrował tempo naciskania (podczas wykonania serii 50 naciśnień), długość pauz pomiędzy dwoma kolejnymi naciśnięciami (ITI – skrót od terminu *Inter-Tap-Interval*) oraz trwanie jednostkowego wciśnięcia przycisku (KTT – skrót od terminu *Key Touching Time*).

Na podstawie wcześniejszych badań opisanych w literaturze uważa się, że ITI odzwierciedla centralny proces związany z planowaniem i przygotowaniem konkretnego ruchu, natomiast KTT – kompleksowy ruch balistyczny mierzony od końca działania mięśni agonistycznych palca do początku działania mięśni antagonistycznych, czyli za proces związany z wykonaniem konkretnego ruchu. Połowa osób badanych zaczynała zadanie ręką prawą, a połowa lewą. 50-elementowe serie naciśnień w przypadku każdej ręki powtarzano dwukrotnie według schematu PPLL lub LLPP.

5. Eksperyment 5: sukcesywne naciskanie na przycisk (*tapping*) w tempie wygodnym (tzw. *personalnym*)

Zadaniem było sukcesywne naciskanie na przycisk w dogodnym dla badanego tempie. Wspomniany poprzednio program komputerowy rejestrował czas potrzebny do wykonania 50 kolejnych naciśnień jedną, a następnie drugą ręką, jak również ITI oraz KTT. Pozostałe dane na temat procedury są identyczne, jak opisane w przypadku eksperymentu 4.

IV. WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki uzyskane w opisanych eksperymentach oraz dyskusja zaobserwowanych zależności przedstawione są w następnym artykule [Kanabus, Szeląg, Szuchnik, Kołodziejczyk, Śliwa, Walkowiak], zamieszczonym w tym tomie „Audiofonologii”.

Ogólnie należy stwierdzić, że pacjenci wykazujący po operacji wszczepienia implantu trudności w rozumieniu mowy przejawiają zaburzone działanie specyficznych mechanizmów kształtujących percepcję czasu.

V. UWAGI KOŃCOWE

Należy nadmienić, że wykazanie w przeprowadzonych eksperymentach zaburzeń w percepcji czasu nie było ostatecznym celem niniejszego cyklu badań. Biorąc pod uwagę wyniki opisanych w literaturze badań na zwierzętach nad zmianami plastycznymi w mózgu w wyniku uczenia się, można przypuszczać, że trening w zakresie percepcji czasu może zaowocować również u ludzi modyfikacjami w zakresie funkcjonowania mechanizmów leżących u podłoża tych procesów percepcyjnych. Przejawiać się to może transferem poprawy na zaburzone funkcje mowy w wyniku podobnych zmian neuroplastycznych, jak te wykazane u zwierząt [Merzenich (i in.) 1996; Tallal (i in.) 1996].

Jak wspomniano wcześniej, pionierskie badania nad zastosowaniem treningu w percepcji czasu w terapii dzieci z opóźnionym rozwojem mowy są obiecujące [Merzenich (i in.) 1996; Tallal (i in.) 1996]. Wnioski odnośnie nowych, niekonwencjonalnych metod terapii logopedycznej można próbować uogólnić również na osoby, którym wszczepiono implant słuchowy. Wykazane przez nas zaburzone funkcjonowanie tych osób w niektórych eksperymentach skłania na zasadzie analogii do przypuszczenia, że tego rodzaju trening może z zadowalającym rezultatem wspomagać klasyczną terapię logopedyczną również w przypadku osób z implantami. Nie budzi wątpliwości fakt, że skuteczna rehabilitacja powinna opierać się na wnikliwym poznaniu mechanizmów mózgowych leżących u podłoża zaburzonego funkcjonowania pacjenta. Takie podejście otwiera nowe horyzonty dla terapii logopedycznej.

Badania nad percepcją czasu u pacjentów z implantami ślimakowymi mają więc ważne znaczenie nie tylko poznawcze, ale również kliniczne i mogą mieć przełomowe znaczenie dla pooperacyjnej terapii w przypadku tej grupy pacjentów.

VI. PODZIĘKOWANIE

Autorzy artykułu dziękują Prof. dr. hab. Henrykowi Skarżyńskiemu za umożliwienie przebadania zoperowanych przez niego pacjentów oraz samym pacjentom za udział w naszych eksperymentach. Pragniemy również wyrazić wyrazy wdzięczności dla Ernsta Pöppela z Monachium za inspirację naukową i konsultacje w toku realizacji badań.

Szczególne podziękowania należą się producentowi implantów – firmie MEDEL z Innsbrucku za udostępnienie interfejsu pomiarowego, niezbędnego w realizacji niniejszych badań, oraz Dr. Arturowi Lorensowi za jego starania w tym zakresie.

Badania zrealizowane w ramach grantu KBN nr PO5B 10119.

Bibliografia

- Efron R. [1990]. The decline and fall of hemispheric specialization. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hellige J. B. [1993]. Hemispheric asymmetry: what's right and what's left. Cambridge: Harvard University Press.
- Kanabus M., Szelag E., Rojek E., Pöppel E. [2002]. Temporal order judgement for auditory and visual stimuli. „Acta Neurobiologiae Experimentalis” 62, 263-270.
- Karger F., Wittmann M., Szelag E., v. Steinbüchel N. [2002]. Cortical involvement in temporal reproduction: evidence for differential roles of the hemispheres. „Neuropsychologia” 20, 357-366.
- Merzenich M., Jenkis W., Johnston P., Schreiner C., Miller S., Tallal P. [1996]. Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. „Science” 271, 77-81.
- Nowak-Czerwińska M. [1994]. Test słuchowego różnicowania głosek (TSRG). W: Mowa głośna i pismo. Materiały z Konferencji Naukowej Sekcji Logopedycznej Towarzystwa Kultury Języka. Białystok s. 10-13.
- Oldfield R. C. [1971]. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. „Neuropsychologia” 9, 97-113.
- Pöppel E. [1989]. Granice świadomości. O rzeczywistości i doznawaniu świata. Tł. A. D. Tauszyńska. Warszawa: PIW.
- Pöppel E., Edingshaus A. L. [1998]. Mózg – tajemniczy kosmos. Tł. M. Skalska. Warszawa: PIW.
- Steinbüchel N. von, Wittmann M., Szelag E. [1999 a]. Temporal constraints of perceiving, generating and integrating information: clinical evidence. „Restorative Neurology and Neuroscience” 14, 167-182.
- Steinbüchel N. von, Wittmann M., Strasburger H., Szelag E. [1999 b]. Auditory temporal-order judgement is associated in brain damaged patients with posterior regions of the left cortical hemisphere. „Neuroscience Letters” 264, 169-171.
- Szelag E. [1997]. Temporal integration of the brain as studied with the metronome paradigm. W: H. Atmanspacher, E. Ruhnau (eds.). Time, Temporality, Now. Berlin: Springer Verlag s. 121-131.
- Szelag E. [1999]. Nowe trendy terapii wyzwaniem dla logopedii XXI wieku. „Logopedia” 26, 215-225.
- Szelag E. [2000]. Neuropsychologiczne podłoże mowy. W: T. Górka, A. Grabowska, J. Zagrodzka (red.). Mózg a zachowanie. Warszawa: PWN s. 429-459.
- Szelag E. [2003]. Neuropsychologiczne korzenie funkcji mowy w normie i patologii. W: T. Gałkowski, G. Jastrzębowska (red.). Logopedia. Opole: Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego (w druku).
- Szelag E., Kowalska J., Rymarczyk K., Pöppel E. [1998]. Temporal integration in a subjective accentuation task as a function of child development. „Neuroscience Letters” 257, 69-72.
- Szelag E., Kowalska J., Rymarczyk K., Pöppel E. [2001]. Duration processing in children as determined by time reproduction: implications for a few seconds temporal window. „Acta Psychologica” 110, 1-19.
- Szelag E., Pöppel E. [2000]. Temporal perception: a key to understand language. „The Behavioral and Brain Sciences” 23, 52.
- Szelag E., von Steinbüchel N., Pöppel E. [1997]. Temporal processing disorders in patients with Broca's aphasia. „Neuroscience Letters” 235, 33-36.
- Szelag E., von Steinbüchel N., Reiser M., de Langen E., Pöppel E. [1996]. Temporal constraints in processing of nonverbal rhythmic patterns. „Acta Neurobiologiae Experimentalis” 56, 215-225.

- Tallal P., Miller S., Bedi G., Byma G., Wang X., Nagarajan S., Schreiner C., Jenkins W., Merzenich M. [1996]. Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. „Science” 271, 81-84.
- Velhagen K., Broschmann D. [1997]. Tafeln zur Prüfung des Farbenseines. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Walkowiak A., Śliwa L. [2003]. Programowanie procesora implantu ślimakowego w badaniach neuropsychologicznych pacjentów implantowanych. „Audiofonologia” 23, 75-83.
- Wittmann M., Steinbüchel N. von, Szelać E. [2001]. Hemispheric specialisation for self-paced motor sequences. „Cognitive Brain Research” 10, 341-344.

Adres do korespondencji:

Elżbieta Szelać
Pracownia Neuropsychologii, Zakład Neurofizjologii,
Instytut Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN
ul. Pasteura 3,
02-093 Warszawa
e-mail: e.szelać@nencki.gov.pl