

Zastosowanie technik neuroobrazowania w audiologii – przegląd literatury

Application of neuroimaging techniques in audiology – literature review

Ewelina Kalicka¹, Olgierd Stielcer², Dorota Hojan-Jeziarska²

1) Strefa słuchu Anna Cierpicka-Świtkowska Cezary Kozub sp.j.
ul. Poborzańska 37 lok. 5U, 03-368 Warszawa

2) Zakład Protetyki Słuchu Katedry Biofizyki Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu
ul. Grunwaldzka 6, 60-780 Poznań

STRESZCZENIE

Cel pracy: Analiza zagadnień z zakresu funkcjonowania nerwowej drogi słuchowej, przebiegu oraz zmian w procesie słyszenia, a także poszukiwania źródła danego problemu audiologicznego, aby zadziałać na przyczynę, a nie tylko objawy. Szeroki przegląd piśmiennictwa poruszającego tematykę zastosowania technik neuroobrazowania u pacjentów audiologicznych zmagających się z różnego typu schorzeniami, patologiami i chorobami w obrębie układu słuchowego – analiza wyników badań oraz dalsze perspektywy wykorzystania neuroobrazowania w audiologii.

Materiały i metody: Wyszukiwanie publikacji poruszających tematykę neuroobrazowania układu słuchowego z wykorzystaniem zarówno strukturalnych, jak i funkcjonalnych metod, do których zaliczamy m.in. rezonans magnetyczny (MRI), funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI), pozytronową tomografię emisyjną (PET), elektroencefalografię (EEG) oraz funkcjonalną spektroskopię bliskiej podczerwieni (fNIRS).

Wyniki: Analizując wyniki badań można zaobserwować ogromne znaczenie zastosowania neuroobrazowania u pacjentów audiologicznych. Autorzy omówionych badań uzyskali takie rezultaty jak: zdiagnozowanie guza kąta mostowo-mózdkowego, znalezienie struktur, które w dużej mierze są odpowiedzialne za powstawanie szumów usznych, wykorzystanie PET do przewidywania zysku z implantacji ślimakowej, czy też zaobserwowanie bardzo dużej neuroplastyczności u osób z ubytkiem słuchu po dopasowaniu aparatów słuchowych.

Wnioski: Badania neuroobrazowe, szczególnie w ostatnich latach, stały się niezbędnym elementem procedury diagnostycznej, a ich wyniki są źródłem wielu informacji o stanie pacjenta audiologicznego. Zastosowanie ich jest konieczne, m.in. w kwalifikacji do implantacji ślimakowej czy też u pacjentów z podejrzeniem niedosłuchu pozaślimakowego wskazującego na guz kąta mostowo-mózdkowego. Przeprowadzenie badań neuroobrazowych pozwala na wskazanie struktur odpowiedzialnych za powstawanie szumów usznych, co w przyszłości może przyczynić się do powstania terapii działającej na ich przyczynę, a nie tylko łagodzącej objawy.

Słowa kluczowe: neuroobrazowanie, audiologia, układ słuchowy

ABSTRACT

Aim of study: Analysis of problems related to the functioning of the nervous auditory pathway, changes in the hearing process, as well as searching for the source of a given problem and acting on the cause, not just symptoms. An in-depth review of the literature on the use of neuroimaging techniques in audiological patients struggling with various diseases and pathologies of the auditory system – analysis of the research results obtained by the authors and further prospects for the use of neuroimaging in audiology.

Material and methods: Searching for publications on the subject of neuroimaging of the auditory system using both structural and functional methods, which include, among others magnetic resonance imaging (MRI), functional magnetic resonance imaging (fMRI), positron emission tomography (PET), electroencephalography (EEG), and functional near infrared spectroscopy (fNIRS).

¹e-mail: ewelina.kalicka.9@gmail.com

Results: Analyzing the results obtained by the authors of the publication, we can observe the great importance of the application of neuroimaging in audiological patients. The authors of the discussed studies obtained such results as: diagnosing vestibulocochlear neuroma, finding structures that are largely responsible for tinnitus, the use of PET to predict the benefit of cochlear implantation, or the observation of very high neuroplasticity in people with hearing loss after fitting the hearing aids.

Conclusions: Neuroimaging studies, especially in recent years, have become an indispensable element of the diagnostic procedure, and their results provide a lot of information about the condition of an audiological patient. Their use is necessary, for example in qualification for cochlear implantation or in patients with suspected hearing loss indicating a tumor of the vestibulocochlear nerve. Conducting neuroimaging tests allows to identify the structures responsible for the tinnitus, which in the future may contribute to the development of a therapy that affects its cause, and not only symptoms. Due to the increasing use of imaging techniques, diagnoses are much faster and much more precise. The continuous development of technology contributes to the emergence of new methods that can further help in the diagnosis and treatment of pathologies related to the auditory system.

Key words: neuroimaging, audiology, auditory system

1. Wprowadzenie

Człowiek odbiera bodźce z otoczenia zewnętrznego głównie za pomocą zmysłów. Jednym z najważniejszych, pod względem procesów poznawczych zmysłów, jest słuch – prawidłowa budowa i funkcjonowanie układu słuchowego są niezbędne do rozwoju mowy oraz komunikacji audytywno-werbalnej ze społeczeństwem [1].

Zmysł słuchu można badać za pomocą wielu różnych metod, zarówno obiektywnych, jak i subiektywnych. Pozwalają one na ocenę poszczególnych fragmentów układu słuchowego, począwszy od ucha zewnętrznego, aż do ośrodków słuchowych w korze mózgowej. Przedstawione w artykule metody sprawdzają funkcjonowanie wybranego fragmentu układu słuchowego lub współdziałanie wielu jego składowych. Grupą badań obiektywnych, w których analizie poddaje się część nerwową układu słuchowego jest neuroobrazowanie. Istnieje wiele technik obrazowych wykorzystywanych w tym celu, do których zaliczamy m.in.: rezonans magnetyczny (MRI), funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI), pozytronową tomografię emisyjną (PET), elektroencefalografię (EEG) oraz funkcjonalną spektroskopię bliskiej podczerwieni (fNIRS) [2].

Poszczególne metody neuroobrazowania mają zasadnicze znaczenie w diagnozowaniu i leczeniu wielu schorzeń i patologii, a także w monitorowaniu efektów zastosowanych terapii w wielu dziedzinach medycyny, w tym audiologii. Dzięki technikom obrazowym możliwe jest diagnozowanie chorób nowotworowych oraz zmian i patologii zachodzących w obrębie nerwowej części układu słuchowego. W literaturze coraz częściej poruszany jest temat neuroplastyczności, reorganizacji oraz mapowania kory mózgowej, a także szukania przyczyn różnych dolegliwości. Ogromny potencjał mają metody obrazowania czynnościowego (PET, fMRI), które pozwalają na badanie procesów zachodzących

w ludzkim mózgu pod wpływem konkretnego bodźca, czy zmian aktywności pewnych wyspecjalizowanych obszarów mózgu jako efekt wywołany np. rehabilitacją słuchową. W ciągu ostatnich 30 lat zaobserwowano znaczący postęp, zwłaszcza w obrazowaniu metodą fMRI. Badania percepcji słuchowej i percepcji mowy są wspierane poprzez zastosowanie technik neuroobrazowania funkcjonalnego, które specjalizują się w lokalizacji odpowiedzi z kory mózgowej. Dzięki ciągłemu poszerzaniu wiedzy, nowym strategiom analizy danych i coraz liczniejszym publikacjom w tym zakresie, możliwe jest przeprowadzanie ukierunkowanych badań neurofizjologicznych, w których badane są aspekty psychoakustyczne. Badania te obejmują pomiary percepcji dźwięku (głośność, wysokość), diagnozowanie szumów usznych, a także pomiary rozumienia mowy. Bardzo ważnym zagadnieniem, pojawiającym się przy wszystkich badaniach z zakresu neuroobrazowania procesu słyszenia, jest to, na jakim etapie drogi słuchowej kodowanie sensoryczne odbieranego dźwięku jest przekształcane w uniwersalną i zależną od kontekstu reprezentację percepcyjną [3].

Metody neuroobrazowania układu słuchowego, szczególnie czynnościowe, można wykorzystać w celu lepszego zrozumienia procesów zachodzących u osób z ubytkiem słuchu, wpływu niedosłuchu na funkcjonowanie poszczególnych obszarów mózgu, a także znalezienia źródła wielu schorzeń i patologii, np. szumów usznych. Pojawia się również szansa na znacznie szybsze i trafniejsze stawianie diagnozy oraz zapewnienie interdyscyplinarnego podejścia do pacjenta [3].

Celem artykułu jest przegląd publikacji dotyczących zastosowania technik neuroobrazowania w audiologii oraz analiza wyników uzyskanych w poszczególnych badaniach. Wiodącymi słowami kluczowymi podczas wyszukiwania publikacji były neuroobrazowanie oraz audiologia, które w kolejnych etapach rozszerzały się

na pojęcia bardziej precyzyjne, takie jak: układ słuchowy, szumy uszne czy ubytek słuchu. Szczególną uwagę zwróciliśmy na liczne zmiany oraz patologie pojawiające się w obrębie układu słuchowego, których diagnozowanie może być znacznie łatwiejsze, szybsze i bardziej precyzyjne, dzięki zastosowaniu metod neuroobrazowych. Szczególnie interesującym zagadnieniem jest obserwowana w badaniach klinicznych ogromna neuroplastyczność struktur wchodzących w skład nerwowej drogi słuchowej, którą obserwujemy m.in. u osób z ubytkiem słuchu, a także po protezowaniu aparatami słuchowymi oraz implantacji ślimakowej.

2. Materiały i metody

Omówione w pracy publikacje były wyszukiwane przede wszystkim za pomocą strony PubMed poprzez wyszukiwanie fraz w języku angielskim, m.in.: „neuroimaging, audiology, auditory system, hearing loss, MRI, fMRI, PET, EEG, fNIRS”. W analizowanych artykułach autorzy badań wykorzystali zarówno strukturalne, jak i czynnościowe metody neuroobrazowania, które umożliwiły im ocenę układu słuchowego na różnych jego poziomach, zarówno pod względem anatomicznym (obrazowanie strukturalne), jak i funkcjonalnym (obrazowanie czynnościowe). Każda z technik charakteryzuje się odmiennym przebiegiem badania oraz inną zasadą działania.

Badanie z wykorzystaniem rezonansu magnetycznego (MRI), który zaliczany jest do obrazowania strukturalnego, polega na wzbudzaniu jąder atomów wodoru badanej struktury pod wpływem fal radiowych o konkretnej częstotliwości, działających na ciało znajdujące się w silnym polu magnetycznym. Wzbudzone jądra atomów wodoru pochłaniają energię wytworzoną przez fale, a następnie oddają ją w postaci fal o takiej samej częstotliwości jak te, które działały na ciało w pierwszym etapie. Wynikiem całego procesu jest obraz strukturalny danego narządu lub jego fragmentu, co pozwala na ocenę budowy anatomicznej poszczególnych elementów układu słuchowego (struktur mózgowia, ucha wewnętrznego czy nerwu przedsionkowo-ślimakowego). MRI wykorzystywany jest podczas diagnostyki układu słuchowego, uwidaczniania guzów kąta mostowo-mózdkowego, oceny struktur przed implantacją ślimakową oraz przewidywania ewentualnego ryzyka operacji [4].

Do technik obrazowania czynnościowego zaliczamy m.in. fMRI, PET, EEG oraz fNIRS. W każdej z tych metod wykorzystuje się inną zasadę działania, jednak każda z nich ma na celu zobrazowanie funkcjonowania naszego organizmu, w tym przypadku nerwowej drogi słuchowej.

Badanie za pomocą funkcjonalnego rezonansu magnetycznego pozwala na analizę pracy mózgu poprzez wykrywanie zmian hemodynamicznych w tkance nerwowej. Odkrycie dotyczące silnych właściwości magnetycznych deoksyhemoglobiny, czyli nieutlenowanej

hemoglobiny znacznie rozszerzyło możliwości zastosowania skanera rezonansu magnetycznego, który od tego momentu zaczęto wykorzystywać również do badań czynnościowych, a nie tylko strukturalnych [2, 5]. Zasada działania fMRI jest bardzo silnie związana z faktem, iż mózg do prawidłowego funkcjonowania musi być zaopatrzony w odpowiednie ilości tlenu oraz glukozy, w związku z tym wzrost aktywności neuronów powoduje większe zapotrzebowanie na te produkty. Wiąże się to bezpośrednio z większym przepływem krwi w aktywizowanym bodźcem obszarze, co prowadzi do lokalnego zwiększenia stosunku hemoglobiny utlenowanej (oksyhemoglobiny) do hemoglobiny nieutlenowanej (deoksyhemoglobiny), który jest rejestrowany za pomocą pomiaru BOLD (ang. blood oxygen level dependent). Wzrost poziomu oksyhemoglobiny wskazuje na większą aktywność danego obszaru mózgu [2, 5].

Badanie PET polega na pomiarze in vivo promieniowania powstającego podczas rozpadu niestabilnych radioizotopów, które wcześniej zostały podane pacjentowi dożylnie lub za pomocą inhalacji. Podstawę pomiarów stanowią fotony gamma wysyłane przez rozpadające się radioaktywne izotopy (^{15}O , ^{11}C lub ^{18}F). Aktywność danego obszaru mózgu mierzona jest poprzez wzrost metabolizmu lub przepływu krwi w określonym regionie – im większe wskaźniki, tym większa aktywność. Dużą zaletą metody PET jest możliwość badania osób z implantem ślimakowym bez obawy o dyskomfort czy ból, co jest niemożliwe w przypadku badania fMRI, ze względu na stosowane tam pole magnetyczne [2].

Elektroencefalografia – EEG jest aktualnie jednym z podstawowych narzędzi diagnostycznych w badaniu ośrodkowego układu nerwowego [6]. Głównym celem tej metody jest rozpoznawanie ognisk w mózgu, które wykazują zmienioną aktywność bioelektryczną oraz pomiar aktywności elektrycznej mózgu powstałej w wyniku reakcji na podany bodziec (np. słuchowy). Badanie to charakteryzuje się wysoką rozdzielczością czasową oraz niską rozdzielczością przestrzenną, dzięki czemu można precyzyjnie określić struktury z najwyższą aktywnością podczas wykonywania danego zadania. Dodatkową zaletą jest fakt, iż badanie przebiega w ciszy, ponieważ aparatura nie produkuje głośnych dźwięków, które mogłyby wpływać na wiarygodność uzyskanych wyników. EEG wykorzystywane jest m.in. w diagnostyce szumów usznych [2].

Neuroobrazowanie za pomocą funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni (fNIRS) ma na celu pomiar aktywności kory mózgowej, np. podczas percepcji bodźców akustycznych. Badanie przeprowadza się za pomocą optod (źródeł oraz detektorów światła) umieszczonych na głowie badanej osoby, które przymocowane są do specjalnego czepka lub opaski. Działanie fNIRS polega na emisji światła przez urządzenie, które stosuje system fali ciągłej. Wykorzystuje się najczęściej dwie

długości fal, które przechodzą przez kolejne „warstwy” (skórę, kości czaszki), aby ostatecznie ulec absorpcji i rozproszeniu. Kluczowym było odkrycie, iż tkanka mózgowa jest transparentna dla światła z zakresu bliskiej podczerwieni (650–1000 nm) [19]. Poziom aktywności wybranego obszaru mózgu oraz stopień zmian hemodynamicznych mierzony jest za pomocą współczynników absorpcji światła bliskiej podczerwieni. Podobnie jak w przypadku metody fMRI poziom aktywności szacowany jest na podstawie zmian w koncentracji utlenowania krwi w danym obszarze, jednak podstawą do obliczeń jest różnica w absorpcji światła bliskiej podczerwieni przez chromofory hemoglobiny utlenowanej i nieutlenowanej [7].

Zasadniczą różnicą między metodą fNIRS oraz fMRI są warunki badawcze panujące podczas przeprowadzania pomiarów. W obrazowaniu za pomocą fNIRS nie jest wykorzystywane pole magnetyczne, dzięki czemu pomiar ten może być bez przeszkód wykonywany u osób posiadających implant ślimakowy. Ponadto aparatura do badań fNIRS nie generuje dodatkowego dźwięku, który mogłyby zakłócać wyniki badania [7].

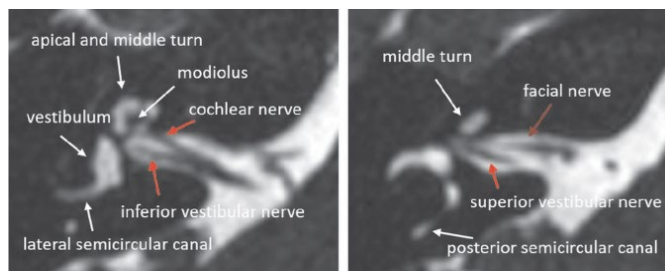
3. Wyniki i dyskusja

3.1 Neuroobrazowanie strukturalne

Wyniki badań z zastosowaniem technik neuroobrazowania strukturalnego ukazują ogromny potencjał wykorzystania tych rozwiązań w diagnostyce układu słuchowego. Neuroobrazowanie strukturalne za pomocą MRI jest szeroko wykorzystywane w audiologii, począwszy od obrazowania struktur układu słuchowego przed wykonaniem implantacji ślimakowej, poprzez diagnozowanie aplazji/hipoplazji nerwu przedsionkowo-ślimakowego, aż po uwidacznianie guzów kąta mostowo-mózdzkowego.

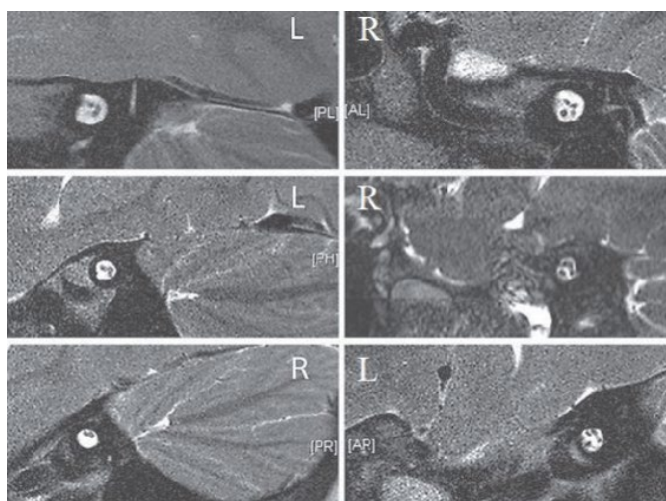
Wykonanie rezonansu magnetycznego jest niezbędnym elementem procedury kwalifikacyjnej do implantacji ślimakowej. Oceniana jest budowa ucha wewnętrznego, kości skroniowej oraz uwidaczniany jest nerw przedsionkowo-ślimakowy. Na podstawie wyników obrazowania zespół diagnostyczny ocenia możliwość przeprowadzania operacji oraz, w razie konieczności, modyfikuje procedurę operacyjną, odrębnie dla danego pacjenta.

Na rys. 1 przedstawiono obraz MRI ucha wewnętrznego z prawidłowo wykształconymi nerwami: ślimakowym, przedsionkowym oraz twarzowym. Badanie MRI jest jedyną metodą obrazowania strukturalnego, które umożliwia uwidocznienie struktur znajdujących się w obrębie płynu w błędniku błoniastym, co umożliwia wizualizację nerwu przedsionkowo-ślimakowego. Stanowi ważny etap kwalifikacji do implantacji ślimakowej, ponieważ niektóre patologie i nieprawidłowości uwidocznione podczas obrazowania przedoperacyjnego mogą całkowicie wykluczyć możliwość przeprowadzenia operacji [8].



Rys. 1. Obraz MRI prawidłowego anatomicznie ucha wewnętrznego. Widoczny nerw ślimakowy (cochlear nerve), nerw przedsionkowy górny (superior vestibular nerve) oraz nerw przedsionkowy dolny (inferior vestibular nerve) – czerwone strzałki, a także nerw twarzowy (facial nerve) – brązowa strzałka (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [8])

Przykładem patologii, którą można uwidocznić za pomocą obrazowania MRI jest częściowe (hipoplazja) lub całkowite (aplazja) niewykształcenie nerwu przedsionkowo-ślimakowego. Jest to jedna z nieprawidłowości, która może wykluczyć przeprowadzenie implantacji ślimakowej. James i wsp. [9] zbadali troje dzieci w wieku 4, 5, 7 i 8 lat, u których zdiagnozowano jednostronną aplazję nerwu ślimakowego oraz jednostronny, głęboki ubytek słuchu po stronie niewykształconego nerwu. Rys. 2 przedstawia wyniki przeprowadzonego badania MRI, które ukazało obecność czterech nerwów – twarzowego, przedsionkowego górnego i dolnego oraz ślimakowego – w obrębie przewodu słuchowego wewnętrznego po stronie ucha z prawidłowym progami słuchowym u wszystkich trzech pacjentów. Natomiast, w przewodzie słuchowym wewnętrznym uszu z głębokim niedosłuchem zaobserwowano tylko trzy nerwy – brak nerwu ślimakowego. Dodatkowo, u jednego z pacjentów widoczne były tylko dwa nerwy po stronie uszkodzonej (nerw twarzowy i nerw przedsionkowy górny) [9].



Rys. 2. Obrazy MRI przewodów słuchowych wewnętrznymi wszystkich pacjentów; każdy wiersz odpowiada innemu pacjentowi z jednostronnym, głębokim ubytkiem słu-

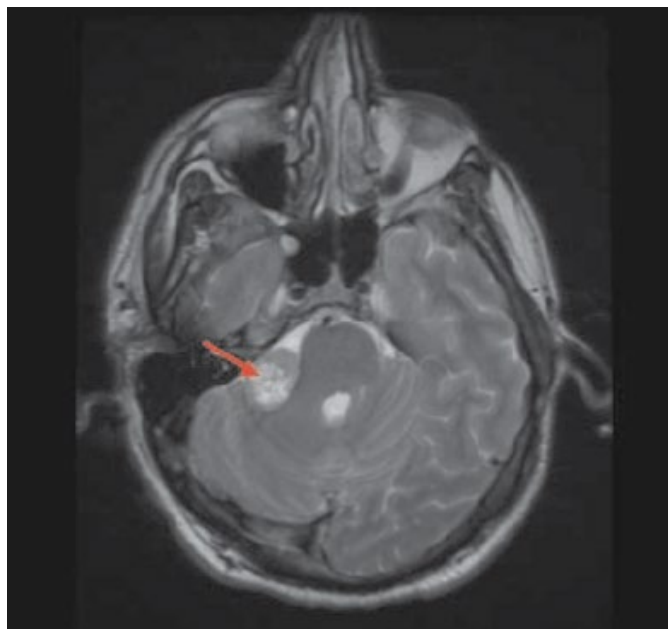
chu. Prawa kolumna: przewody słuchowe wewnętrzne uszu z prawidłowym progiem słuchowym; widoczne są cztery nerwy (twarzowy, przedsionkowy górny i dolny oraz ślimakowy). Lewa kolumna: przewody słuchowe wewnętrzne uszu z głębokim niedosłuchem; brak nerwu ślimakowego. W jednym z przypadków, oprócz braku nerwu ślimakowego, nie zaobserwowano także obecności nerwu przedsionkowego dolnego (trzeci wiersz, lewa kolumna); P – prawe ucho, L – lewe ucho (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [9])

Kolejnym ważnym zastosowaniem obrazowania strukturalnego jest uwidacznianie guzów kąta mostowo-mózdkowego za pomocą MRI tylnego dołu czaszki z kontrastem Gd-DTPA (Gadolin z kwasem pentetynowym). Pacjenci kierowani są na to badanie zazwyczaj w momencie, kiedy wyniki audiometrii tonalnej i słuchowych potencjałów wywołanych z pnia mózgu (ABR) wskazują na pozaślimakową lokalizację uszkodzenia słuchu. Rezonans magnetyczny jest badaniem, które potwierdza obecność guza nerwu VIII oraz jest szczególnie przydatne w momencie uwidaczniania guzów małych rozmiarów (nawet od 2 mm) [10].

W około 2,5-10% przypadków nerwiak nerwu VIII objawia się jako nagła, jednostronna głuchota. Należy pamiętać, iż jednostronne uszkodzenie słuchu, każdego stopnia, powinno być bardzo wnikliwie diagnozowane pod kątem możliwości występowania nerwiaka nerwu VIII. W Klinice Otolaryngologii i Onkologii Laryngologicznej PUM w Szczecinie Kabacińska i Koryzma [11] poddali analizie okres od 2011 do 2013 roku. W tym czasie hospitalizowano 87 pacjentów z nagłym, jednostronnym pogorszeniem słuchu nieznanego przyczyny. U wszystkich pacjentów na proces diagnostyczny składała się audiometria tonalna, audiometria impedancyjna oraz rejestracja słuchowych potencjałów wywołanych z pnia mózgu. Każdy pacjent, u którego zaobserwowano nieprawidłowości w wynikach ABR był kierowany na badanie MRI, w celu oceny kąta mostowo-mózdkowego oraz nerwu VIII po stronie, gdzie występował niedosłuch [11].

Odchylenia od normy w badaniu ABR (m.in. wydłużenie interlatencji I-III, wydłużenie latencji fali V) zaobserwowano u 29 pacjentów i wszystkich skierowano na badanie MRI. Dodatkowo, badanie MRI wykonano także u pacjentów z prawidłowym wynikiem ABR, ale z brakiem poprawy progu słuchowego po zastosowanym leczeniu. W wynikach badań MRI u 5 pacjentów, ze wszystkich skierowanych na rezonans magnetyczny, rozpoznano nerwiaka nerwu VIII. Na rys. 3 przedstawiono obraz MRI jednego z pacjentów, u którego zdiagnozowano nerwiaka o wymiarach 25 × 16 × 23 mm. Uwagę autorów publikacji zwrócił fakt, iż wspomniany

pacjent uzyskał poprawę progu słuchowego po zastosowanym wcześniej leczeniu oraz dodatkowo, jako jedyny pacjent ze wszystkich, u których został rozpoznany guz, nie miał nieprawidłowości w zakresie funkcjonowania narządu równowagi [11].



Rys. 3. Wynik obrazowania metodą MRI kąta mostowo-mózdkowego z uwidocznionym nerwiakiem nerwu VIII (czerwona strzałka) (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [11])

Obrazowanie strukturalne dostarcza wielu niezbędnych informacji o budowie układu słuchowego oraz zmianach anatomicznych występujących w jego obrębie. Zastosowanie neuroobrazowania w procedurze diagnostycznej może pozwolić na precyzyjne uwidocznienie guzów kąta mostowo-mózdkowego oraz odpowiednio szybko wdrożyć procedurę operacyjną. Ponadto wykorzystanie technik obrazowania strukturalnego w procesie kwalifikacji do implantacji ślimakowej może uchronić przed podjęciem niewłaściwej decyzji o wykonaniu zabiegu, np. w przypadku aplazji nerwu ślimakowego.

3.2 Neuroobrazownie czynnościowe

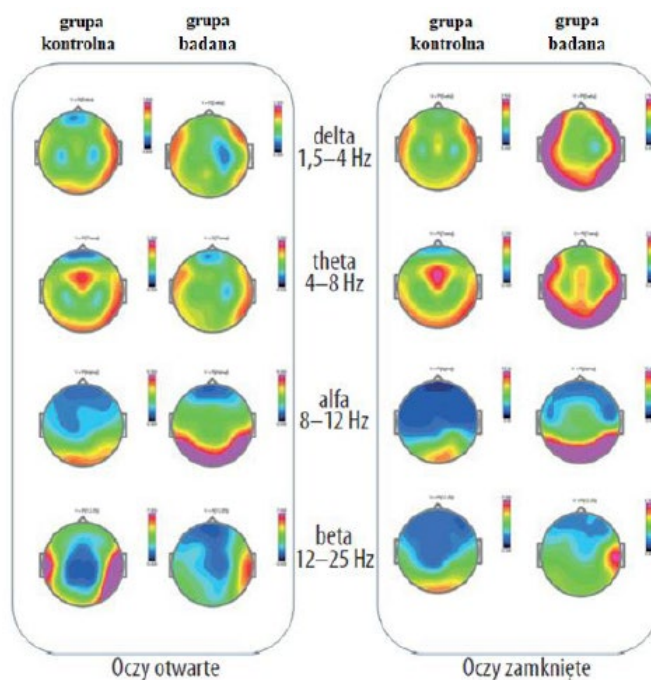
W ostatnich latach wielu badaczy mocno skupia się na metodach obrazowania czynnościowego, które ukazują zmiany zachodzące w obrębie nerwowej drogi słuchowej, a przede wszystkim w korze mózgowej. Pozwala to na analizę zmian w aktywności poszczególnych struktur u pacjentów cierpiących na różnego rodzaju zaburzenia oraz nieprawidłowości układu słuchowego, a także ukazuje zdolność mózgu do kompensacji opartej o neuroplastyczność zachodzącej np. w wyniku implantacji ślimakowej lub protezowania za pomocą aparatów słuchowych.

Szeroko stosuje się opisane metody w przypadku szu-

mów usznych (tinnitus), które często są bardzo uciążliwe dla pacjenta oraz powodują nerwowość, problemy ze snem, a nawet depresję. Istnieje wiele teorii odnośnie patomechanizmu powstawania szumów usznych, jednak aktualnie najbardziej prawdopodobna wydaje się hipoteza, która mówi o konieczności wystąpienia dwóch czynników. Pierwszym z nich jest uszkodzenie drogi słuchowej, które prowadzi do deprivacji słuchowej. Konsekwencją tego jest zwiększenie neuronalnej aktywności spoczynkowej w korze słuchowej oraz pojawienie się zmian w organizacji tonotopowej ośrodków słuchowych. Dochodzi także do zwiększenia aktywności w układzie limbicznym oraz korze przedczołowej. Drugim czynnikiem jest niezdolność OUN (ośrodkowego układu nerwowego) do eliminacji błędnej informacji słuchowej [12].

Współczesne metody obrazowania odegrały istotną rolę w określeniu wymienionych powyżej obszarów ośrodkowego układu nerwowego, które są silnie związane z występowaniem szumów usznych. Ponadto techniki neuroobrazowania są wykorzystywane w ukazywaniu zmienionej aktywności neuronalnej i bioelektrycznej wybranych struktur oraz zmian w organizacji tonotopowej u osób cierpiących na szumy uszne [12].

Lewandowska i in. [13] zbadali spoczynkową bioelektryczną aktywność mózgu u pacjentów z przewlekłymi, obustronnymi szumami usznymi. Grupę badaną stanowiło 6 pacjentów cierpiących na szumy uszne, natomiast grupa kontrolna składała się z 7 osób bez szumów usznych. U obu grup wykonano badanie EEG w stanie spoczynku – z zamkniętymi i otwartymi oczami – oraz porównano uzyskane wyniki. Stwierdzono specyficzny wzorec aktywności bioelektrycznej u osób z szumami usznymi, który wykazywał nadmierną ekspresję fal wolnych w regionach potylicznych, skroniowych i skroniowo-czołowych przy oczach zamkniętych. Ponadto, zarówno przy oczach zamkniętych, jak i otwartych wykazano zwiększoną liczbę fal wolnych alfa w okolicach skroniowo-potylicznych i potylicznych. Oprócz zmiany w czynności elektrycznej fal wolnych, zaobserwowano także wzmożoną ekspresję fal szybkich w prawej okolicy skroniowej (oczy zamknięte). Wyniki badania przedstawione na rycinie 4 wskazują na to, iż na powstanie szumów usznych wpływa aktywność wielu struktur mózgu, niekoniecznie należących do korowych ośrodków słuchowych. Analizy dokonano na podstawie widma mocy bezwzględnej kilku zakresów częstotliwości dla fal wolnych: delta (1,5–4 Hz), theta (4–8 Hz), alfa (8–12 Hz) oraz szybkich – beta (12–25 Hz) [13].



Rys. 4. Mapy rozkładu mocy bezwzględnej dla fal wolnych i szybkich obliczone z sygnałów EEG zarejestrowanych u osób z szumami usznymi (grupa badana) oraz zdrowych pacjentów (grupa kontrolna); badania przeprowadzono podczas spoczynku z oczami otwartymi, a następnie zamkniętymi (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [13])

Przeprowadzone dotychczas badania obrazowe mózgu ujawniły zmiany w układzie nerwowym u pacjentów z szumami usznymi, szczególnie o charakterze przewlekłym. Warto zaznaczyć, iż odmienna aktywność nie ogranicza się jedynie do obszarów słuchowych mózgu – zaangażowane są również struktury układu limbicznego, a także ośrodki i połączenia odpowiedzialne za uwagę i pamięć. Analiza przypadków wskazuje na to, iż często szumy uszne współwystępują z niedosłuchem. Zastosowanie aparatów słuchowych rekompensuje współistniejący ubytek słuchu oraz może zmniejszać percepcję szumów usznych, a w konsekwencji zredukować rozdrażnienie, nerwowość oraz inne efekty uboczne. W badaniu przeprowadzonym przez Simonetti i in. [14] wykorzystano neuroobrazowanie za pomocą pozytronowej tomografii emisyjnej (PET), które wykonano w stanie spoczynku u osób cierpiących na szumy uszne. Celem badania było zaobserwowanie zmian metabolicznych i funkcjonalnych w mózgu po sześciu miesiącach stosowania aparatów słuchowych przez pacjentów z przewlekłym szumem usznym i towarzyszącym odbiorczym ubytkiem słuchu. W badaniu wzięły udział 33 osoby z ubytkiem słuchu w stopniu lekkim/umiarkowanym: 19 z szumami usznymi (uciążliwe, trwające dłużej niż 6 miesięcy) i 14 bez szumów usznych. Badanie PET przeprowadzono u wszystkich uczestników przed dopasowaniem aparatów słuchowych oraz 6 miesięcy

po dopasowaniu. Po upływie sześciu miesięcy od doboru aparatów słuchowych zmniejszyła się dokuczliwość szumów usznych. Analiza wykazała zwiększony metabolizm glikolityczny w lewej korze oczodołowo-czołowej, prawym płacie skroniowym i prawym hipokampie oraz zmniejszony metabolizm glikolityczny w lewej półkuli mózdzku i dolnym płacie ciemieniowym w grupie osób z szumami usznymi. Grupa kontrolna (osoby z ubytkiem słuchu, ale bez szumów usznych) nie wykazała istotnych zmian metabolicznych. Wyniki badania pozwoliły zidentyfikować obszary związane ze spadkiem odczuwania szumów usznych w wyniku zastosowania aparatów słuchowych. Obszary mózgu uwzględnione w tym badaniu mogą być częścią większej sieci neuronalnej, która bierze udział w powstawaniu przewlekłego szumu w uszach [14].

Opisane powyżej wyniki wskazują na efektywne możliwości zastosowania aparatów słuchowych w terapii szumów usznych. Odpowiednio dobrane i dopasowane urządzenie może znacząco zredukować odczuwanie szumów usznych, a także wpłynąć na funkcjonowanie układu nerwowego, czyli zadziałać u źródła problemu. W przypadku występowania jednocześnie niedosłuchu oraz szumów usznych aparaty słuchowe przynoszą podwójną korzyść. Rekompensują ubytek słuchu oraz pomagają w lepszym rozumieniu mowy, a dodatkowo wpływają na zmniejszenie subiektywnej dokuczliwości odczuwania szumów usznych oraz pozwalają na powrót do prawidłowego funkcjonowania, dzięki redukcji stresu i irytacji [14].

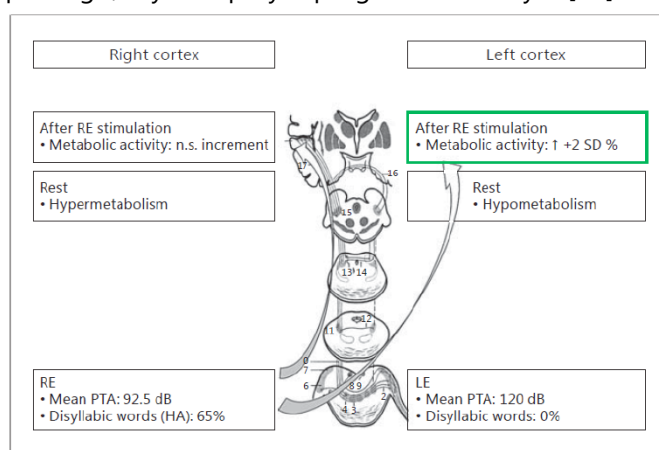
Funkcjonalne metody neuroobrazowania mogą być również wykorzystywane w trudnych diagnostycznie przypadkach asymetrycznego niedosłuchu, w których inne metody nie dają pełnego obrazu oraz nie dostarczają wystarczającej ilości informacji. Asymetria może wystąpić między dwoma uszami z niedosłuchem różnego stopnia, a także między uchem z ubytkiem słuchu a uchem z progiem słuchowym w normie. Utrata słuchu w omawianych przypadkach może wahać się od łagodnej do głębokiej oraz może wystąpić zarówno przy niedosłuchu odbiorczym, przewodzeniowym, jak i mieszanym [15].

Asymetryczny niedosłuch jest bardzo często dużym problemem diagnostycznym oraz wymaga precyzyjnego postępowania podczas doboru i dopasowania pomocy słuchowych. Ocena wielkości asymetrii progów słuchowych między uszami w obustronnych niedosłuchach opiera się na różnicy w wynikach audiometrii tonalnej obliczonej dla częstotliwości 0,5 ÷ 4 kHz oraz różnicy w natężeniu bodźca, który wywoła pojawienie się morfologicznie poprawnej fali V w badaniu ABR. Ponadto, warto wspomnieć, iż asymetryczna utrata słuchu jest ważnym czynnikiem ryzyka nerwiaka nerwu VIII, w związku z tym zawsze należy przeprowadzić wnikliwą i dokładną diagnostykę takiego przypadku [16].

W artykule opublikowanym przez Cardier i in. [17] przedstawiono badania przeprowadzone za pomocą metody PET u 21 pacjentów z asymetrycznym ubytkiem słuchu. Badanie wykonane było w spoczynku, a następnie po stymulacji słuchowej, w celu zmierzenia wzrostu aktywności mózgu w ipsi- i kontrlateralnej korze słuchowej, dostarczając dowodów potwierdzających zalecenie określonego leczenia oraz strony, po której zostanie wszczepiony implant ślimakowy [17].

Jedną z pacjentek była 28-letnia kobieta z wrodzonym, głębokim niedosłuchem czuciowo-nerwowym w lewym uchu (średnia tonalna; 0,5 ÷ 4 kHz: 120 dB HL) oraz z dyskryminacją mowy na poziomie 0%. Dodatkowo, od 10 lat występował progresywny niedosłuch czuciowo-nerwowy w prawym uchu, który osiągnął stopień głęboki 2 lata temu (średnia tonalna; 0,5 ÷ 4 kHz: 92,5 dB HL). Aparat słuchowy zastosowany w prawym uchu spowodował wzrost poziomu dyskryminacji do 65%. Nie stwierdzono nieprawidłowości w badaniu otologicznym ani w obrazie tomografii komputerowej [17].

Podczas badania PET, stan wyjściowy wykazał hipometabolizm w lewej korze słuchowej i wzrost aktywności w korze prawej, czyli po przeciwnej stronie od ucha gorszego. Po stymulacji akustycznej ucha prawego (lepszego) wykazano istotny wzrost metabolizmu w korze lewej oraz brak istotnych statystycznie zmian w korze prawej. Stymulacja ucha lewego nie wykazała zmian w aktywności metabolicznej, zarówno w prawej jak i w lewej korze, w porównaniu z aktywnością podstawową. Na rys. 5 przedstawiono schemat ukazujący wyniki badania PET w spoczynku oraz po stymulacji ucha prawego, czyli z lepszym progiem słuchowym [17].



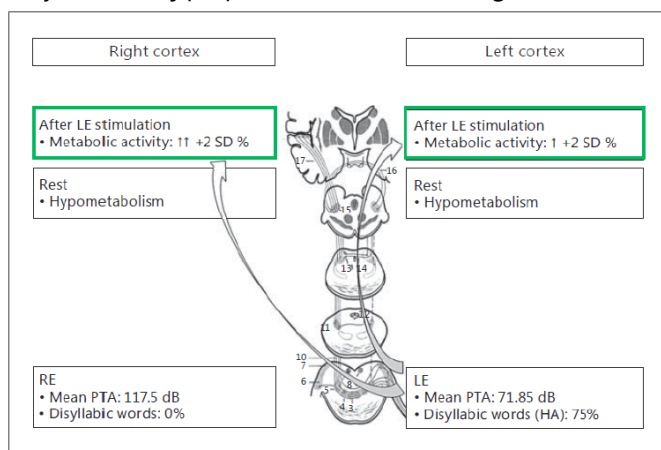
Rys. 5. Wyniki badania PET w spoczynku i po stymulacji prawego ucha (RE). LE = lewe ucho; n.s. = nieistotne; zieloną ramką zaznaczono istotny wzrost metabolizmu po stymulacji ucha prawego (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [17])

Po analizie wyników badania PET zalecona została implantacja ucha prawego (lepszego). Decyzję podjęto na podstawie dwóch głównych faktów: po pierwsze, wyniki

badania PET odradzały implantację w uchu słabszym, ze względu na to, iż po jego pobudzeniu nie obserwowano wzrostu metabolizmu, ani w lewej ani w prawej korze słuchowej. Drugim czynnikiem jest historia postępującego ubytku słuchu, a co za tym idzie, oczekiwanie na pogorszenie słuchu w krótkim okresie. Przewidywana była znacznie lepsza korzyść z implantu ślimakowego, niż aparatu słuchowego. W trakcie 7-letniej obserwacji pacjentka wykazała wynik dyskryminacji mowy na poziomie 84% dla słów dwusylabowych w prawym uchu (z implantem ślimakowym) [17].

Drugim opisanym w publikacji pacjentem był 60-letni mężczyzna z historią zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych przebytego w wieku 3 miesięcy. Cierpiał na postępujący niedosłuch czuciowo-nerwowy w prawym uchu (średni próg słyszenia; 0,5 ÷ 4 kHz: 117,5 dB HL) z dyskryminacją mowy na poziomie 0%. Ponadto mężczyzna zmagął się przez 35 lat z postępującym niedosłuchem ucha lewego (średni próg słyszenia; 0,5 ÷ 4 kHz: 71,85 dB HL). Był użytkownikiem aparatów słuchowych od 10. roku życia, dzięki którym dyskryminacja mowy dla słów dwusylabowych wynosiła 75%. Badanie MRI nie wykazało żadnych nieprawidłowości [17].

Badanie PET w spoczynku wykazało hipometabolizm, zarówno w lewej jak i w prawej korze słuchowej. Stymulacja ucha lewego (z lepszym progiem słuchowym) spowodowała wzrost aktywności metabolicznej w korowych ośrodkach słuchowych w obu półkulach mózgu w porównaniu ze stanem spoczynkowym. Silniejsza aktywacja została zaobserwowana w korze kontrlateralnej (prawej) do ucha stymulowanego. Rys. 6 przedstawia schemat aktywacji kory słuchowej po pobudzeniu ucha lewego [17].



Rys. 6. Wyniki badania PET w spoczynku i po stymulacji ucha lewego (LE). RE – ucho prawe; zielonymi ramkami zaznaczono istotny wzrost stymulacji po stymulacji ucha lewego (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [17])

Na podstawie powyższych wyników wykazujących hipometabolizm w obydwu korowych ośrodkach słuchowych w stanie podstawowym oraz wzrost metabolizmu po stymulacji ucha lewego (z lepszym progiem słucho-

wym), zalecono implantację ślimakową ucha prawego. W ten sposób zapewniona została stymulacja bimodalna: ucho prawe (z gorszym progiem słuchowym) stymulowane było przez implant ślimakowy, natomiast w uchu lewym kontynuowano stymulację za pomocą aparatu słuchowego. Po 7 latach obserwacji poziom dyskryminacji mowy dla słów dwusylabowych wynosił: 71% dla implantowanego ucha prawego, 84% dla aparatowanego ucha lewego oraz 96% dla obydwu uszu z zastosowaniem stymulacji bimodalnej (implant ślimakowy w uchu prawym i aparat słuchowy w uchu lewym) [17].

Podsumowując, badania przeprowadzone przez Cardier i in. [17] można wnioskować, iż metoda PET jest przydatnym narzędziem oceny w wybranych przypadkach ubytku słuchu, w których informacja o stanie metabolicznym drogi słuchowej może wpłynąć na istotne decyzje np. o tym, które ucho zostanie poddane implantacji ślimakowej [17].

Ponadto asymetryczny ubytek słuchu w postaci głuchoty jednostronnej charakteryzuje się tym, iż słuchowe obszary kory mózgowej nie otrzymują normalnych (prawidłowych) danych wejściowych. Są one w pewnym stopniu zmniejszone lub zdegradowane, ze względu na głęboki niedosłuch jednego ucha. W takiej sytuacji mamy do czynienia z pewnego rodzaju „zamianą” obszarów mózgu, które normalnie przetwarzają dźwięk przez inne, sprawne modalności, czyli z reorganizacją między-modalną. Pomimo posiadania prawidłowego progu słuchowego w jednym z uszu, pacjenci z jednostronną głuchotą doświadczają wielu problemów w codziennym funkcjonowaniu, takich jak trudności ze zrozumieniem mowy w hałasie czy też kłopoty z lokalizacją dźwięków. Dodatkowo, badania wskazują, że dzieci z jednostronną głuchotą są bardziej narażone na opóźnienia mowy i języka, a także nieprawidłowy rozwój psychoruchowy oraz zaburzenia zachowania [18].

Problem asymetrycznego ubytku słuchu badał zespół pod kierownictwem Polonenko [19]. W badaniu wzięły udział dzieci, u których zdiagnozowano głuchotę w jednym uchu, natomiast w drugim – ubytek słuchu różnego stopnia (od łagodnego do głębokiego) lub słuch prawidłowy. U pacjentów z niedosłuchem w obydwu uszach zastosowano stymulację bimodalną, czyli dla ucha z mniejszym ubytkiem słuchu zastosowano akustyczny aparat słuchowy, natomiast ucho głuche poddane było implantacji ślimakowej. Rozwiązanie tego typu zapewnia zarówno akustyczną, jak i elektryczną stymulację układu słuchowego. Głównym celem tego badania była identyfikacja plastyczności kory słuchowej wywołanej przez implant ślimakowy u dzieci z asymetrycznym ubytkiem słuchu [19].

W badaniu wzięło udział 10 dzieci z asymetrycznym ubytkiem słuchu, które były zaimplantowane w wieku $8,7 \pm 5,1$ lat po okresie $3,1 \pm 3,6$ lat funkcjonowania z asymetrią słuchu. U dziewięciorga dzieci zaimplan-

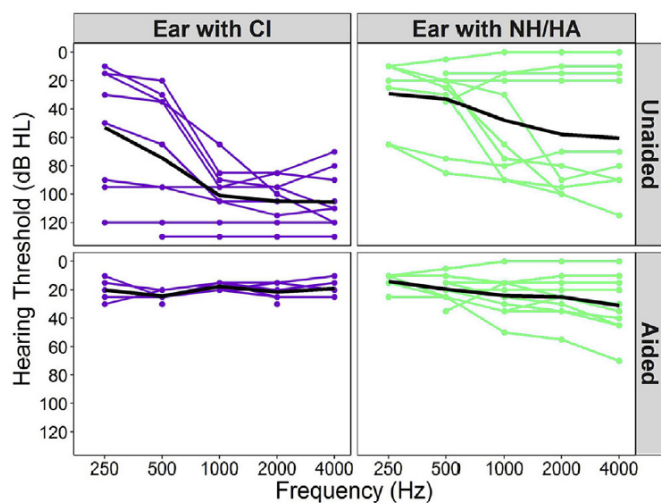
towano ucho lewe, natomiast u jednego – ucho prawe. W dalszej analizie pod uwagę brano jedynie dzieci z implantem ślimakowym w uchu lewym. Pozostałe informacje dotyczące pacjentów zostały podane w tabeli 1 [19].

Tab. 1. Informacje o pacjentach biorących udział w badaniu; CMV – wrodzony wirus cytomegalii, SD – odchylenie standardowe, CI – implant ślimakowy (zmodyfikowane na podstawie [19])

Subject	Implanted ear	Etiology	Age (years)		Hearing experience (years)	
			Diagnosed	Implanted	Pre-CI acoustic	Asymmetric
1	Right	Unknown	0.0	12.1	12.0	0.0
2	Left	CMV	2.2	3.3	3.3	3.3
3	Left	Genetic	0.2	9.7	8.5	8.5
4	Left	Unknown	6.0	9.4	6.4	3.4
5	Left	Unknown	12.9	14.2	12.9	1.3
6	Left	Unknown	0.2	13.6	13.5	0.0
7	Left	CMV	0.1	3.6	3.5	3.5
8	Left	Unknown	5.0	15.2	10.2	10.2
9	Left	Genetic	0.1	4.8	4.7	0.0
10	Left	CMV	0.0	1.1	1.1	1.1
Mean ± SD			3.0 ± 4.4	8.7 ± 5.1	7.6 ± 4.4	3.1 ± 3.6

CMV – Congenital cytomegalovirus; SD – standard deviation; CI – cochlear implant.

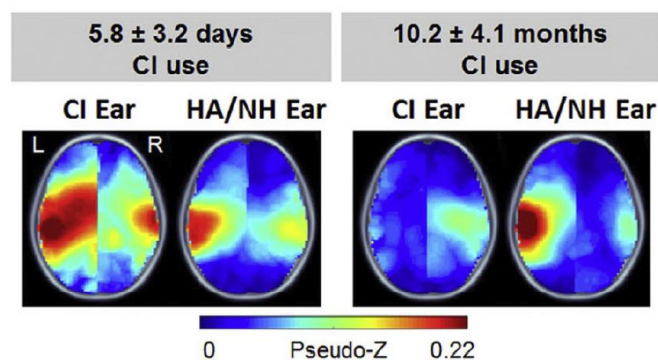
Z wyników audiometrii tonalnej (rys. 1), można wnioskować, iż czterech pacjentów miało słuch w normie dla niskich częstotliwości (250 Hz i 500 Hz) w uchu implantowanym. U sześciu z dziesięciorga dzieci występował ubytek słuchu w obydwu uszach (asymetryczny), natomiast u pozostałych w uchu nieimplantowanym słuch był w normie (rys. 7) [19].



Rys. 7. Progi słuchowe przed (górny rząd) i po implantacji ślimakowej oraz protezowaniu aparatem słuchowym (dolny rząd). Kolor fioletowy – ucho implantowane (CI); kolor zielony – ucho z prawidłowym słuchem (NH) lub protezowane aparatem słuchowym (HA). Czarna linia oznacza średni próg słuchowy w grupie badanej (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [19])

Podczas badania aktywności korowej mózgu podawane były bodźce słuchowe do każdego ucha osobno, których natężenie było równe najbardziej komfortowemu słyszeniu u każdego z pacjentów. Bodźce składały się z trwających 36 ms ciągów dziewięciu tonów podawanych do ucha nieimplantowanego oraz z dzie-

więciu impulsów elektrycznych podawanych do ucha z implantem ślimakowym. W trakcie słuchania bodźców mierzony był poziom aktywacji kory mózgowej w odpowiedzi na stymulację. Na rys. 8 przedstawiono najbardziej aktywne regiony mózgu, jakimi były pola słuchowe w płatach skroniowych. Warto jednak zauważyć pojawiające się zmienności wraz z upływem czasu od implantacji. Po około sześciu dniach od wszczepu odnotowano aktywację kory słuchowej zarówno w lewej, jak i prawej półkuli po stymulacji ucha lewego (implantowanego). Dodatkowo, aktywacji uległa również kora czołowa. Silna, początkowa aktywacja w lewej korze czołowo-skroniowej, wywołana poprzez stymulację ucha z implantem ślimakowym, zmniejszyła się wraz z trwającym doświadczeniem stymulacji bimodalnej w badanej grupie dzieci. Po upływie około dziesięciu miesięcy od operacji odnotowano aktywację jedynie w kontrlateralnej korze słuchowej (prawej) w odniesieniu do ucha implantowanego. Stymulacja ucha nieimplantowanego wywoływała przede wszystkim aktywację kory kontrlateralnej (lewej) zarówno w pierwszym jak i drugim badaniu [19].



Rys. 8. Widok osiowy źródeł średniej, wywołanej aktywności korowej (kolor czerwony oznacza wyższy stosunek sygnału do szumu = większa aktywacja); CI ear – ucho implantowane, HA/NH ear – ucho protezowane aparatem słuchowym lub ze słuchem prawidłowym (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [19])

Aktywacja obserwowana w ipsilateralnej (lewej) korze mózgowej, krótko po implantacji ślimakowej, może wskazywać na większą niż zwykle uwagę poświęconą nowemu rodzajowi stymulacji za pośrednictwem implantu. Jednak, wraz z czasem pojawiła się bardziej typowa, kontrlateralna aktywacja obszarów skroniowych kory mózgowej w odpowiedzi na bodziec słuchowy [19, 20].

Jedną z najnowszych metod neuroobrazowania czynnościowego jest technika funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni. Sevy i in. [21] jako pierwsi opublikowali doniesienie o udanym zastosowaniu techniki fNIRS u pacjentów pediatrycznych z implantami ślimakowymi. Przetestowali oni zdolność tej metody do detekcji odpowiedzi kory mózgowej na bodźce słuchowe (konkretnie sygnał mowy). Pierwszym etapem badań

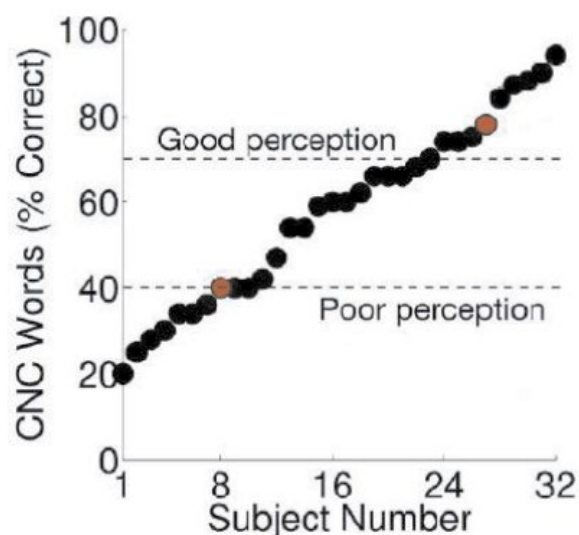
było sprawdzenie skuteczności fNIRS. W tym celu porównano odpowiedzi kory słuchowej zmierzone za pomocą metody fMRI i fNIRS u osób dorosłych ze słuchem prawidłowym. Obszar zainteresowania, który był analizowany w badaniu, został utworzony ze wszystkich pikseli, które wykazywały znaczną aktywność w górnym zakręcie skroniowym, lokalizacji pierwotnej kory słuchowej i ośrodków asocjacyjnych. Optody wykorzystane w badaniu fNIRS zapewniały pokrycie dużego obszaru płata skroniowego i górnego zakrętu skroniowego [21].

Następnie przeprowadzono pomiary wyłącznie za pomocą techniki fNIRS w czterech różnych grupach. Wyniki wykazały aktywność kory mózgowej wywołaną sygnałem mowy: u wszystkich dorosłych osób (11/11) i 82% dzieci (9/11) ze słuchem prawidłowym, u 78% dzieci głuchych, które posiadały implant ślimakowy dłużej niż 4 miesiące (28/36) oraz u 78% dzieci głuchych, u których badanie zostało przeprowadzone tuż po pierwszej aktywacji procesora mowy w implantach ślimakowych. Powyższe badania wykazały, iż metoda fNIRS jest w stanie zmierzyć aktywność korową u dzieci z implantem ślimakowym oraz może być używana jako narzędzie do oceny korzyści z urządzenia. Ponadto technika ta może być wykorzystywana podczas monitorowania efektów rehabilitacji słuchowej u osób z implantem ślimakowym, czy też u użytkowników aparatów słuchowych [21].

Kolejne badanie przeprowadzone z użyciem metody fNIRS zostało opublikowane przez Olds i in. [22] w 2016 roku. Autorzy zwrócili szczególną uwagę na fakt, iż zdolność rozumienia mowy u pacjentów z implantami ślimakowymi jest bardzo zróżnicowana. Postanowili dokładniej przyjrzeć się temu zagadnieniu oraz lepiej poznać z czego może wynikać zmienność wyników zrozumiałości mowy u implantowanych pacjentów. Wykorzystali obrazowanie funkcjonalne techniką fNIRS, aby uwidocznili poziom aktywności w ośrodkach słuchowych kory mózgowej oraz porównali uzyskane wyniki z behawioralnymi miarami percepcji mowy [22]. W badaniu wzięty udział 32 dorosłe osoby (w wieku 23-86 lat) z postlingwalną głuchotą, które były użytkownikami implantów ślimakowych (długość użytkowania wahała się od 1 dnia do 12 lat) oraz 35 osób w wieku 24-65 lat, z prawidłowym słuchem, stanowiących grupę kontrolną. Obszarem zainteresowania były boczne płaty skroniowe oraz górny zakręt skroniowy, w których badana była odpowiedź wywołana bodźcem mowy o różnym stopniu zrozumiałości. Sygnały mowy podzielone były na 3 grupy: mowa normalna (normal), mowa kanałowa (channelized; wokodowana na 20 pasm częstotliwości – jak w implantach ślimakowych) i mowa szyfrowana (scrambled; 20 pasm częstotliwości w losowej kolejności). Bodźcem kontrolnym były dźwięki środowiska (environmental). Do oceny pomiarów behawioralnych wykorzystano próg rozumienia mowy, listę słów CNC (Consonant-Nucleus-Consonant; częstotliwość wystę-

powania fonemów w listach słownych CNC koreluje z częstotliwością występowania tych fonemów w życiu codziennym) oraz test zdaniowy AzBio (1000 zdań nagranych przez dwie kobiety i dwóch mężczyzn). Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone w ciszy [22, 23].

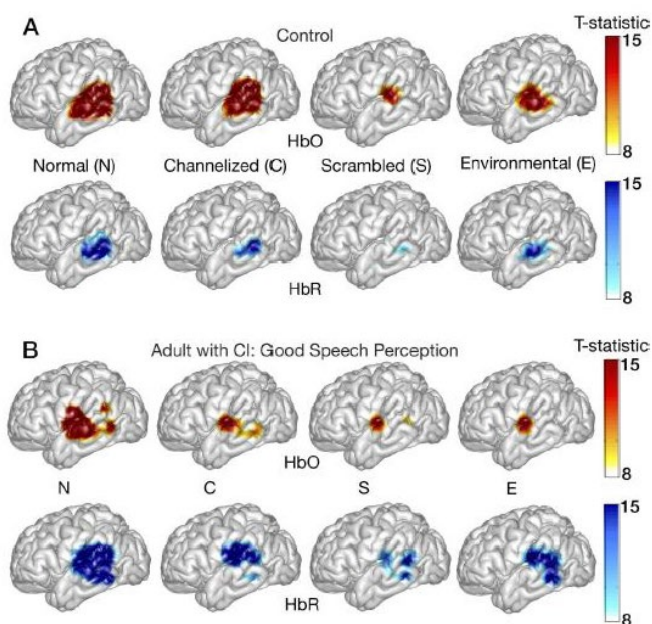
W teście CNC przeprowadzonym u osób z implantem ślimakowym wyniki wahały się od 20% do 94% (średnia wynosiła 58%). Ze względu na bardzo dużą rozbieżność wyników postanowiono z grupy badanej wydzielić dwie dodatkowe, mniejsze podgrupy. Osoby z wynikiem testu CNC na poziomie 70% lub więcej przydzielono do podgrupy z dobrą percepcją mowy, natomiast osoby z wynikiem 40% lub mniej przydzielono do podgrupy ze słabą percepcją mowy. Do podgrup trafiło 10 osób z najlepszymi wynikami (dobra percepcja mowy) i 10 osób z najłabszymi wynikami (słaba percepcja mowy), graficznie przedstawiono na rycinie 9 [22].



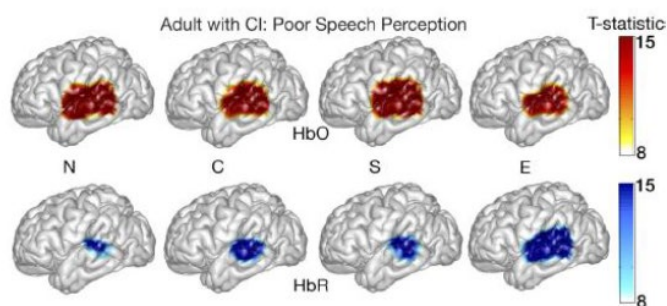
Rys. 9. Wyniki testu słownego CNC w grupie badanej (dorosłe osoby z implantami ślimakowymi), na podstawie których określono podgrupy o dobrej i słabej percepcji mowy (przerwane linie na rycinie); Good perception – dobra percepcja mowy, Poor perception – słaba percepcja mowy (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [22])

Ostateczne wyniki badania wykazały, że zarówno grupa kontrolna, jak i użytkownicy implantów ślimakowych z dobrą percepcją mowy, uzyskali większą aktywację wybranych obszarów kory mózgowej w odpowiedzi na mowę normalną w porównaniu z sygnałem mowy utrudnionej (mowa szyfrowana i kanałowa) (rys. 10). Z kolei, u osób z implantem ślimakowym i słabą percepcją mowy zarejestrowano dużą, ciężką do sprecyzowania aktywację kory mózgowej na wszystkie bodźce (rys. 11). Stosunek aktywacji korowej na normalną mowę w porównaniu do mowy utrudnionej koreluje z wynikami testu słownego CNC oraz testu zdaniowego AzBio. Natomiast, nie wykazano korelacji między badanym wzorcem aktywacji korowej a progiem słuchowym,

wiekem, stroną implantacji oraz czasem jaki upłynął od wszczęcia implantu ślimakowego. Ciekawą obserwacją przyniosło badanie, w którym porównano aktywację korową u pacjentów z implantem ślimakowym z włączonym urządzeniem oraz kiedy urządzenie było wyłączone. Wyniki przedstawione na rycinie 12 jednoznacznie wskazują na znacznie zmniejszoną aktywację kory mózgowej przy wyłączonym implancie u wszystkich badanych osób [22].

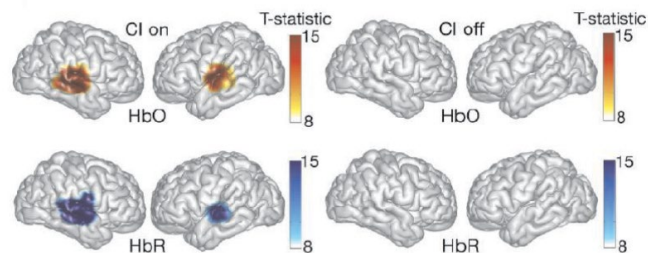


Rys. 10. Aktywacja lewej kory mózgowej w odpowiedzi na bodźce mowy o różnych poziomach zrozumiałości i dźwięki środowiskowe dla (A) grupy kontrolnej oraz (B) dla osoby dorosłej z implantem ślimakowym z dobrą percepcją mowy; HbO – oksyhemoglobina (utlenowana hemoglobina), HbR – deoksyhemoglobina (odtlenowana hemoglobina), N – mowa normalna, C – mowa kanałowa S – mowa szyfrowana, E – dźwięki środowiska (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [22])



Rys. 11. Aktywność korowa w odpowiedzi na bodźce mowy o różnym stopniu zrozumiałości dla osoby dorosłej z implantem ślimakowym ze słabą percepcją mowy; HbO – oksyhemoglobina (utlenowana hemoglobina), HbR – deoksyhemoglobina (odtlenowana hemoglobina), N – mowa normalna, C – mowa kanałowa S – mowa szyfrowana, E – dźwięki środowiska (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [22])

szyfrowana, E – dźwięki środowiska (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [22])



Rys. 12. Mapy odpowiedzi hemodynamicznej z kory mózgowej u osoby dorosłej z implantem ślimakowym słuchającej normalnej mowy przy włączonym (CI on) i wyłączonym (CI off) urządzeniu; HbO – oksyhemoglobina (utlenowana hemoglobina), HbR – deoksyhemoglobina (odtlenowana hemoglobina); (zdjęcie zmodyfikowane na podstawie [22])

4. Wnioski

Zarówno strukturalne, jak i funkcjonalne obrazowanie układu słuchowego dostarcza wielu ważnych informacji dotyczących zmian oraz patologii występujących w obrębie układu słuchowego. Warto podkreślić, iż neuroobrazowanie czynnościowe jest niezwykle przydatne w obserwacji reorganizacji kory mózgowej zachodzącej po rehabilitacji słuchowej. Prawidłowe zaopatrzenie w pomoce słuchowe może przynieść fenomenalne efekty widoczne nie tylko z zewnątrz – poprawa komunikacji, reakcji słuchowych czy mowy – ale także wewnątrz, czyli ogromna neuroplastyczność ośrodkowego układu słuchowego i adaptacja do nowych warunków życia.

Autorzy analizowanych publikacji zwracają szczególną uwagę na nieodłączną współpracę dwóch dziedzin medycznych – audiologii i neurologii – w diagnozowaniu pacjentów audiologicznych. Uzupełnianie się tych dwóch obszarów jest niezbędne w momencie kwalifikacji do implantacji ślimakowej, aby wdrożyć prawidłową procedurę operacyjną oraz uwidocznic wszelkie nieprawidłowości, które mogłyby zostać uznane jako przeciwwskazanie do wszczęcia implantu. Niezwykle pomocną procedurą wydaje się być obrazowanie czynnościowe za pomocą metody PET, dzięki której można przewidzieć efekt implantacji oraz zdecydować, które ucho wykazuje większe szanse na zadowalający zysk z implantu ślimakowego. Wraz z rozwojem technologii i większą dostępnością do badań neuroobrazowych, możliwe będzie znacznie częstsze wykonywanie badania PET przed implantacją ślimakową. Wyniki przytoczonego w pracy badania wskazują, iż może to znacznie poprawić efektywność implantacji oraz przynieść pacjentom większy zysk i lepsze funkcjonowanie w społeczeństwie.

Obrazowanie czynnościowe ma bardzo duży potencjał w odniesieniu do monitorowania wprowadzonego leczenia/terapii oraz odpowiedniego ich modyfikowania.

Znalezienie źródła szumów usznych, dzięki zastosowaniu neuroobrazowania funkcjonalnego może pozwolić na stworzenie modelu terapii lub leczenia działającego na przyczynę problemu, a nie tylko łagodzącego objawy. Leczenie, którego efektem będzie całkowite pozbycie się szumów usznych może być przełomowe w walce z tym problemem. Wielu pacjentów poczułoby ogromną ulgę, szczególnie Ci zmagający się z uciążliwym, chronicznym szumem usznym, który nie pozwala prawidłowo funkcjonować w społeczeństwie – wywołuje złość, frustrację, a nawet depresję. Skuteczne leczenie trafiające w źródło powstawania szumów usznych byłoby przełomowym odkryciem o niewątpliwie ogromnej wartości klinicznej. Coraz liczniejsze badania neuroobrazowe szumów usznych przybliżają do precyzyjnego określenia miejsca powstawania szumów usznych i stworzenia modelu odpowiedniej terapii przy czynowej.

Ciągły rozwój technologii przyczynia się do wprowadzania nowych rozwiązań, które mogą w jeszcze większym stopniu pomóc w diagnozowaniu i leczeniu patologii związanych z układem słuchowym. Jednym z najnowszych zastosowań metod neuroobrazowych jest wykorzystanie techniki fNIRS do monitorowania aktywności kory słuchowej. Odkrycie to jest szczególnie przydatne do badania zmian w aktywności obszarów słuchowych kory mózgowej u osób z implantem ślimakowym, co było wcześniej praktycznie niemożliwe przez stosowanie pola magnetycznego w badaniu fMRI. Obserwacja tych zmian dostarcza wiele cennych informacji o funkcjonowaniu kory słuchowej, a przede wszystkim jej reorganizacji po implantacji ślimakowej.

Dzięki wykorzystaniu technik neuroobrazowania czynnościowego zaobserwowano charakterystyczną reorganizację aktywności kory mózgowej oraz przywracanie bardziej typowej aktywności w wyniku implantacji ślimakowej oraz protezowania za pomocą aparatów słuchowych. Oprócz korzyści i widocznych zmian – poprawa słyszenia, rozumienia mowy oraz komunikacji, obserwujemy także ogromne pozytywne zmiany w najważniejszej składowej, nie tylko układu słuchowego, ale całego organizmu, czyli w mózgu.

Neuroobrazowanie stało się nieodłącznym elementem w procesie diagnostycznym, a także w innych procedurach audiologicznych tj. implantacja ślimakowa. Wykonanie zestawu badań audiologicznych, foniatrycznych i obrazowych zdecydowanie przyspiesza postawienie diagnozy oraz wprowadzenie leczenia bądź innego rodzaju interwencji.

Przegląd piśmiennictwa dotyczącego tematyki neuroobrazowania pokazuje bardzo istotną rolę zastosowania ww. metod w diagnostyce pacjentów audiologicznych. Badania te są niezwykle istotnym narzędziem w przypadku pacjentów, którzy zmagają się z szumami usznymi, ubytkiem słuchu czy też chorobami obejmującymi

układ słuchowy. Ponadto są niezbędnym elementem podczas kwalifikacji pacjentów do implantacji ślimakowej, oceny stanu ślimaka po zapaleniu opon mózgowo-rdzeniowych czy diagnozowaniu aplazji/hipopoplazji nerwu przedsionkowo-ślimakowego.

Bibliografia

1. Śliwińska-Kowalska M. (redaktor), *Audiologia kliniczna*, Wydawnictwo MEDITON Oficyna Wydawnicza, Łódź, 2005
2. Wolak T., *Obrazowanie czynnościowe (fMRI) ośrodkowych procesów słuchowych*, Warszawa, 2018
3. Talavage T.M., Gonzalez-Castillo J., Scott S.K., *Auditory neuroimaging with fMRI and PE*, *Hear Res*, 2014, 307, s. 4-15
4. Wolak T., Cieśla K., Lorens A., Szkiełkowska A., Skarżyński H., *Czy neurony lubią ciszę?*, Warszawa, 2018
5. Ogawa S., Lee T.M., Kay A.R., Tank D.W., *Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation*, *Proc Natl Acad Sci USA*, 1990, 87(24), s. 9868-9872
6. Konturek S., *Fizjologia człowieka. Tom IV. Neurofizjologia*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 1998
7. Wysocka J., Golec K., Pluta A., *Zastosowanie techniki fNIRS w badaniach mechanizmów neuronalnych poznania społecznego. Przegląd najważniejszych badań*, *Polskie Forum Psychologiczne*, 2020, 25(1), s. 21-39
8. Widmann G., Dejaco D., Luger A., Schmutzhard J., *Pre- and post-operative imaging of cochlear implants: a pictorial review*, *Insights into Imaging*, 2020, 11, article number: 93
9. James A., Dixon P., Harrison R., *Cochlear Nerve Aplasia with Detectable Olivocochlear Efferent Function: a Distinct Presentation of Auditory Neuropathy Spectrum Disorder*, *Audiol Neurotol*, 2018, 23, s. 39-47
10. Narożny W., Siebert J., *Współczesne możliwości diagnostyki i terapii guzów kąta mostowo-mózdkowego*, *Forum Medycyny Rodzinnej*, 2010, 4(1), s. 32-43
11. Kabacińska A., Koryzma A., Nagła głuchota jako objaw osłoniaka nerwu VIII, *Polski przegląd otorynolaryngologiczny* 2, 2013, s. 189-193
12. Niedziałek I., Sarnicka I., Lewandowska M. i wsp., *Patomechanizmy szumów usznych – przegląd wybranych hipotez*, *Nowa Audiofonologia*, 2014, 3(1), s. 15-19
13. Lewandowska M., Milner R., Ganc M. i wsp., *Bioelektryczna aktywność spoczynkowa mózgu osób*

- z obustronnymi szumami usznymi – wyniki wstępne, *Nowa Audiofonologia*, 2013, 2(3), s. 40–46
14. Simonetti P. i wsp., Evaluating the efficacy of hearing aids for tinnitus therapy – A Positron emission tomography study, *Brain Res*, 2022, 1775
 15. Sanhueza I., Manrique-Huarte R., Calavia D., Huarte A., Manrique M., Hearing Impairment and Quality of Life in Adults with Asymmetric Hearing Loss: Benefits of Bimodal Stimulation, *J Int Adv Otol*, 2019, 15(1), s. 62-9
 16. Obrębowski A., Wiskirska-Woźnica B., Czerniejewska H., Ocena obustronnego asymetrycznego niedosłuchu czuciowo-nerwowego w praktyce audiologicznej, *Otolaryngol Pol*, 2010, 64(6), s. 382-384
 17. Cardier M., Zulueta-Santos C., Manrique-Huarte R. i wsp., Functional Neuroimaging Studies in Asymmetric Hearing Loss, *Audiol Neurotol*, 2015, 20(1), s. 48–52
 18. Sharma A., Glick H., Cortical neuroplasticity in hearing loss: Why it matters in clinical decision-making for children and adults, *Hearing Review*, 2018, 25(7), s. 20-24
 19. Polonenko M.J., Papsin B.C., Gordon K.A., Cortical plasticity with bimodal hearing in children with asymmetric hearing loss, *Hearing Research*, 2019, 372, s. 88-98
 20. Polonenko M.J., Gordon K.A., Cushing S.L., Papsin B.C., Cortical organization restored by cochlear implantation in young children with single sided deafness, *Nature. Scientific Reports*, 2017, 7(16900)
 21. Sevy A., Bortfeld H., Huppert T.J. i wsp., Neuroimaging with Near-Infrared Spectroscopy Demonstrates Speech-Evoked Activity in the Auditory Cortex of Deaf Children Following Cochlear Implantation, *Hear Res*, 2010, 270(1-2), s. 39–47
 22. Olds C., Pollonini L., Abaya H. i wsp., Cortical activation patterns correlate with speech understanding after cochlear implantation, *Ear Hear*, 2016, 37(3), s. 160-172
 23. Spahr A.J., Dorman M.F., Litvak L.M. i wsp., Development and validation of the AzBio sentence lists, *Ear Hear*, 2012, 33(1), s. 112–117