

BARWY
CISZY



CHOPIN
UNIVERSITY PRESS

Chapters by prof. Henryk Skarżyński:

1. Cisza a rozwój drogi słuchowej człowieka

(autorzy: Szkiełkowska A., Skarżyński H., Kazanecka E., Kurowska-Janecka A.,
w: Barwy ciszy. Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina, 2019, 11-24)

2. Czy neurony lubią ciszę?

(autorzy: Wolak T., Cieśla K., Lorens A., Szkiełkowska A., Skarżyński H.,
w: Barwy ciszy. Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina, 2019; s. 25-39)

BARWY CISZY

Cisza
w środowisku naturalnym
i w kreacji artystycznej

pod redakcją Tomiry Rogali

Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina

Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina

Recenzja naukowa:

dr hab. Krzysztof Lipka, prof. UMFC

dr hab. Violetta Przech, prof. AM im. Feliksa Nowowiejskiego w Bydgoszczy

Redaktor naukowy: dr hab. Tomira Rogala, prof. UMFC

Współpraca: dr hab. Andrzej Miśkiewicz, prof. UMFC

Opracowanie redakcyjne: Ewelina Sroczyńska

Tłumaczenie: Grzegorz Morkowski

Skład i łamanie: Krystyna Sieradzka

Projekt okładki i nadruku na płytę CD: Bartłomiej Drejewicz

Mastering CD: Krzysztof Kuraszkiewicz

Redaktor prowadzący: Anna Krzysztofik

© Autorzy artykułów

© Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina

Warszawa 2019

ISBN 978-83-65990-28-0



Wydawnictwo Uniwersytetu Muzycznego Fryderyka Chopina

chopinuniversitypress.pl

chopinup.pl

Druk i oprawa: www.totem.com.pl

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie.....	7
Cisza w aspekcie fizjologicznym.....	9
Agata Szkiełkowska, Henryk Skarżyński, Ewa Kazanecka, Magdalena Kurowska-Janecka – <i>Cisza a rozwój drogi słuchowej człowieka...</i>	11
Tomasz Wolak, Katarzyna Cieśla, Artur Lorens, Agata Szkiełkowska, Henryk Skarżyński – <i>Czy neurony lubią ciszę?</i>	25
Małgorzata Szymańska – <i>Czasowe przesunięcie progu słyszenia reżyserów dźwięku – cisza niezbędnie potrzebna?</i>	43
Cisza w ujęciu filozoficzno-estetycznym	63
Magdalena Dankowska] – <i>O związkach ciszy i milczenia</i>	65
Krzysztof Kościów – <i>Cisza w dziele i cichość dzieła. W poszukiwaniu tematycznych kontekstów estetycznych</i>	75
Tadeusz Osiński – <i>Cisza w kontekście fenomenologicznej analizy brazu dźwiękowego, jako jeden z aspektów fonograficznej postaci dzieła muzycznego</i>	99
Magdalena Stępień – „Joga to zatrzymanie poruszeń świadomości” – <i>fenomen ciszy w filozofii jogi</i>	113
Cisza oblicza ciszy	123
Niels Galley – <i>Psychologiczne aspekty ciszy</i>	125
Anna Gruszczyńska-Ziółkowska – <i>Koncepcja ciszy w pejzażu andyjskim</i> ..	133
Krzysztof Makomaska – <i>O (niewygodnej) ciszy i fenomenie muzyki tła</i>	155
Paweł Morkowski – <i>Między dźwiękiem a dźwiękiem cisza i wdziękiem</i>	167

Cisza w dziele fonicznym i fonograficznym	177
Andrzej Brzoska – <i>Cisza i milczenie jako intrygujący gest foniczny</i>	179
Marietta Morawska-Büngeler – <i>Cisza w radiu. Ile i jakie cisze nadaje radio?</i>	187
Krzysztof Kuraszkiwicz – <i>Cisza w nagraniach dokonywanych we wnętrzach obiektów sakralnych</i>	211
Cisza w muzyce	223
Tomira Rogala – <i>Czas trwania dźwięku, czas trwania pauzy</i>	225
Katarzyna Szymańska-Stułka – „ <i>Między ciszą a ciszą sprawy się kołyszają</i> ” – o przestrzeni ciszy w muzyce.....	239
Alicja Gronau-Osińska – <i>Próba typologii ciszy w muzyce na przykładzie własnej twórczości</i>	253
Cisza w filmie	279
Joanna Napieralska – <i>Dialog ciszy z dźwiękiem</i>	281
Krzysztof Szlifirski – <i>Cisza jako efekt dźwiękowy w filmie</i>	295
Marian Szukalski – <i>Cisza jako element warstwy dźwiękowej filmu</i>	305

Magdalena Szkiełkowska^{1,2}, Henryk Skarżyński^{1,2},
Teresa Kazanecka¹, Agnieszka Kurowska-Janecka³
¹ Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina (do 2018)
² Diagnostyczne Centrum Słuchu, Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu,
Warszawa/Kajetany
³ Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina

CISZA A ROZWÓJ DROGI SŁUCHOWEJ CZŁOWIEKA

Prawidłowy słuch warunkuje rozwój intelektualny człowieka i umiejętność komunikowania się za pomocą mowy oralnej. Słuch stanowi główny kanał sensoryczny dla mózgu. Zatem dźwięk, przechodząc przez wszystkie piętra drogi słuchowej, nie tylko spełnia funkcję informacyjną, lecz także stanowi czynnik energetyczny dla mózgu. Mózg ludzki wymaga ciągłej stymulacji bodźcami w odpowiedniej dawce i o odpowiedniej jakości, co powoduje stan podstawowego pobudzenia, przygotowującego go do dalszej aktywności. Układ słuchowy jest najważniejszym dostarczycielem energii do mózgu i powoduje większą stymulację kory mózgowej niż którykolwiek z pozostałych zmysłów. W rozwoju zmysłów w okresie prenatalnym obecne jest zjawisko intersensoryczności, co oznacza, że rozwój poszczególnych zmysłów przebiega współzależnie. Osłabienie lub brak dopływu do jednego ze zmysłów lub docieranie bodźców o dużej sile w okresie kształtowania się danej funkcji może spowodować zaburzenie rozwoju nie tylko tej funkcji, lecz także innych zmysłów.

Zbyt duża stymulacja układu słuchowego ma bezpośredni wpływ na ucho środkowe i wewnętrzne, pośredni natomiast na układ nerwowy i psychikę oraz inne narządy. Nadmierny hałas wywołuje efekt w postaci czasowej podniesienia się progu słyszenia, czyli okresowej utraty czułości słuchu. Powtarzające się epizody gorszego słyszenia prowadzą do trwałych uszkodzeń słuchu. Autorzy prezentują w pracy konsekwencje zdrowotne, które wynikają z nadmiernej stymulacji układu słuchowego, jak również zaburzenia komunikatywne będące konsekwencją oddziaływania ciszy na układ słuchowy.

Słowa **kluczowe**: droga słuchowa, cisza, zaburzenia słuchu, hałas

SILENCE AND THE DEVELOPMENT OF THE HUMAN AUDITORY PATH

Normal hearing is conditioned by the intellectual development of man and the ability to communicate by oral speech. The hearing is the main sensory channel for the brain. Thus, the sound passing through all stages of the auditory pathway performs not only an information function, but also constitutes an energy factor for the brain. The human brain requires continuous stimulation with appropriate stimuli of appropriate quality, resulting in a state of basic excitation that prepares it for further activity. The auditory system is the most important energy provider to the brain and causes stronger stimulation of the cerebral cortex than any of the other senses. In the development of the senses, during the prenatal period, there is a phenomenon of intersensory stage, which means that the development of individual senses is interdependent. The weakening or lack of stimuli into one of the senses or the presence of powerful stimuli during the development of a given function may cause disorder of development of not only this function, but also of other senses.

Too much stimulation of the auditory system has a direct effect on the middle and inner ear, and indirectly affects the nervous system and psyche and other organs. Excessive noise produces an effect in the form of a temporary hearing threshold shift, which is a periodic loss of hearing sensitivity. Repeated episodes of worse hearing lead to permanent hearing loss. The authors will present in the paper the health consequences of over-stimulation of the hearing system as well as the communicative disorders resulting from the effect of silence on the hearing system.

Key words: auditory pathway, silence, hearing impairment, noise

WPROWADZENIE

Prawidłowy słuch warunkuje rozwój intelektualny człowieka i umiejętność komunikowania się za pomocą mowy ustnej. Słuch stanowi główny kanał sensoryczny dla mózgu. Zatem dźwięk, przechodząc przez wszystkie piętra drogi słuchowej, nie tylko spełnia funkcję informacyjną, lecz także stanowi czynnik energetyczny dla mózgu. Mózg ludzki wymaga ciągłej stymulacji bodźcami w odpowiedniej dawce i o odpowiedniej jakości, co powoduje stan podstawowego pobudzenia, przygotowującego go do dalszej aktywności. Układ słuchowy jest najważniejszym dostarczycielem energii do mózgu i powoduje większą stymulację kory mózgowej niż którykolwiek z pozostałych zmysłów. Z punktu widzenia medycyny i neurofizjologii cisza, a tym samym odcięcie człowieka od bodźców dźwiękowych, może oznaczać zarówno zaburzenia w rozwoju drogi słuchowej, jak i mniejszą energię dla rozwoju zmysłów i stanu poznawczego człowieka. W rozwoju zmysłów w okresie prenatalnym obecne jest zjawisko intersensoryczności, co oznacza, że rozwój poszczególnych zmysłów przebiega współzależnie. Gdy w okresie kształtowania się

danej funkcji następuje osłabienie lub brak dopływu bodźców, bądź też docierają bodźce o dużej sile, może to spowodować zaburzenie rozwoju nie tylko tej funkcji, lecz także zaburzenia w obrębie innych zmysłów. Zbyt duża stymulacja układu słuchowego ma bezpośredni wpływ na ucho środkowe i wewnętrzne, pośredni na układ nerwowy i psychikę oraz inne narządy wewnętrzne. Zatem nadmierny hałas, jak również długotrwała cisza, czyli izolacja od dopływu dźwięków, mogą zostawiać trwałe ślady w organizmie człowieka.

ROZWÓJ DROGI SŁUCHOWEJ

Słuch jest w okresie życia płodowego najlepiej rozwiniętym zmysłem. W chwili urodzenia dziecka jego ucho jest całkowicie dojrzałe do pracy. Część przedrdzeniowa narządu słuchu jest funkcjonalnie sprawna, natomiast nerw słuchowy jest całkowicie zmielinizowany, a słuchowe ośrodki w korze mózgowej są już elektrycznie aktywne. Badania pokazują, że płód zaczyna reagować na bodźce akustyczne w 16. tygodniu życia. Silne dźwięki powodują zmiany w aktywności dziecka, wywołują przyspieszenie akcji serca czy niepokój ruchowy. Płód jest w stanie odróżnić głos matki od innych dźwięków docierających z zewnątrz. Klasycznym dowodem i przykładem takiej zależności jest sytuacja, gdy łagodny głos matki jest w stanie uspokoić dziecko będące w jej łonie, a obiektywnym miernikiem takiego stanu jest zwolnienie czynności serca płodu, które możemy monitorować. Dźwięki docierają do płodu na drodze kostnej. Płód znajduje się w środowisku wodnym, a płyn wypełnia również przestrzeń ucha środkowego. Zatem dźwięki, które słyszy płód, są zmodyfikowane, przefiltrowane przez środowisko płynne. Nadal istnieje dyskusja i kontrowersje dotyczące tego, co słyszy płód. Ponieważ dźwięki niskiej częstotliwości, takie jak bicie serca, oddech czy odgłosy ruchów robaczkowych jelit, są lepiej przewodzone przez środowisko płynne, wydaje się, że są odbierane przez płód jako najgłośniejsze. Jednakże płód słyszy również dźwięki wysokiej częstotliwości, które występują również w mowie. Dźwięki dochodzące do dziecka w okresie prenatalnym stwarzają warunki do ćwiczeń w różnicowaniu ich cech fizycznych. Zatem dziecko rodzi się już ze zdolnością do różnicowania dźwięków o charakterze sensomotorycznym. Reaguje więc na dźwięki o różnej charakterystyce jako na bodźce, bez wyrobionego jeszcze pojęcia dźwięku i świadomości różnicy zachodzącej między nimi. Po urodzeniu rozwija się u dziecka reprezentacja poznawcza dźwięków, związana z umiejętnością symbolizacji.

Prenatalne doświadczenia słuchowe umożliwiają noworodkowi reagowanie na mowę ludzką oraz dostosowywanie swoich ruchów do rytmu mowy osób z otoczenia. Bogate wyposażenie percepcyjne sprawia, że dziecko po urodzeniu potrafi organizować na podstawowym poziomie docierające do niego różnorodne wrażenia zmysłowe i reagować na nie zgodnie z indywidualnymi preferencjami. W odniesieniu do zmysłu słuchu noworodek już od momentu urodzenia potrafi różnicować

bodźce dźwiękowe o różnej wysokości, głośności i czasie trwania. W pierwszych tygodniach życia następuje gwałtowny wzrost zdolności do różnicowania dźwięków, rozpoznawania dźwięków i melodii znanych z okresu prenatalnego oraz widoczna jest preferencja dźwięków wysokich. Dziecko rozpoznaje głos matki, a ponadto zauważalna jest jego preferencja głosów kobiecych i zdolność lokalizacji źródła dźwięku.

Narząd słuchu u człowieka składa się z części obwodowej i ośrodkowej. W części obwodowej następuje przewodzenie i recepcja dźwięków oraz kodowanie w odpowiednie impulsy nerwowe, które transmitowane są na kolejne poziomy drogi słuchowej. Część ośrodkowa narządu słuchu wyposażona jest w liczne połączenia synaptyczne, które umożliwiają opracowanie zakodowanych informacji dźwiękowych, korelację z wzorem impulsów z przeciwnego ucha i opracowanie wrażenia słuchowego w obrębie kory mózgowej. Na tym piętrze drogi słuchowej powstaje informacja o wysokości, głośności i lokalizacji źródła dźwięku. Dźwięk dociera do narządu odbiorczego drogą powietrzną i drogą kostną. Najbardziej istotną częścią aparatu, który przewodzi dźwięki, jest ucho środkowe wraz z błoną bębenkową.

Fala akustyczna, po przejściu przez przewód słuchowy zewnętrzny, uderza w błonę bębenkową i wprawia ją w drgania. Za pośrednictwem błony bębenkowej zostaje wprawiony w ruch łańcuch kosteczek słuchowych. Ostatnia w kolejności z kosteczek, strzemiączko, ma bezpośredni kontakt z przestrzeniami płynowymi ucha wewnętrznego. Ruch strzemiączka powoduje przesuwanie płynów ucha wewnętrznego, pobudzając narząd Cortiego.

W wyniku działania układu dźwigni kosteczek drgania błony bębenkowej zostają wzmocnione dwukrotnie przed przeniesieniem na podstawę strzemiączka. Do wzmocnienia transmitowanego dźwięku przyczynia się również rezonans jamy bębenkowej i komórek powietrznych wyrostka sutkowatego. W pewnych warunkach łańcuch kosteczek ucha środkowego może powodować tłumienie docierających dźwięków. Pod wpływem dźwięków o wysokim natężeniu następuje reakcja obronna, polegająca na skurczu mięśni śróduszných, które działają synergistycznie. W takim mechanizmie może dojść do usztywnienia łańcucha kosteczek przez wciągnięcie błony bębenkowej (mięsień napinacz błony bębenkowej) i zmniejszenia wychylenia podstawy strzemiączka (mięsień strzemiączkowy). Usztywnienie łańcucha kosteczek tłumí głównie tony niskie i średnie. Warunki akustyczne w jamie bębenkowej zależą od panującego w niej ciśnienia, które regulowane jest przez trąbkę Eustachiusza. Wszelkie zaburzenia powietrzności ucha środkowego sprawiają, że dźwięk przechodzący przez układ przewodzący jest bardziej tłumiony.

Wspomniany powyżej narząd Cortiego składa się z dwóch rodzajów komórek słuchowych. Są to ułożone w pojedynczym rzędzie komórki słuchowe wewnętrzne w liczbie ok. 3500 oraz ułożone w trzech rzędach komórki słuchowe zewnętrzne w liczbie ok. 12000. Komórki słuchowe są wyspecjalizowane w odbieraniu bodź-

cow o różnych częstotliwościach. Komórki odpowiedzialne za słyszenie wysokich częstotliwości znajdują się przy podnawie ślimaka, a im dalej, tym niższe częstotliwości odbierane są przez komórki słuchowe. Oba typy komórek posiadają części ecytowej rzęski. Komórki słuchowe wraz z komórkami podporowymi znajdują się na błonie podnawnej narządu Cortiego.

Komórki słuchowe unerwione są przez dwa rodzaje włókien nerwowych: włókna aferentne (przewodzące bodźce dośrodkowo, tzn. od ślimaka do ośrodkowego układu nerwowego), czyli włókna nerwu słuchowego, w liczbie ok. 30000, biegnące z obwodu do ośrodków centralnych, oraz włókna eferentne (odśrodkowe), czyli przewodzące bodźce od ośrodkowego układu nerwowego do ślimaka), tzn. włókna oliwkowo-ślizakowymi, w liczbie kilkuset, biegnące od oliwki na obwód ślimaka. Zdecydowana większość (93%) włókien aferentnych ślimaka unerwia komórki słuchowe wewnętrzne, jedynie 7% włókien aferentnych związanych jest z komórkami słuchowymi zewnętrznymi. Włókna aferentne przewodzą pobudzenie do ośrodkowego układu nerwowego i pozwalają na powstanie wrażenia dźwięku. Włókna eferentne, według badań, pełnią rolę ochronną w sytuacji urazu uszy, hamując nadmierną odpowiedź ślimaka w przypadku zbyt silnych bodźców, które mogłyby uszkodzić narząd Cortiego. Pobudzenie włókien eferentnych ślimaka występuje na zasadzie sprzężenia zwrotnego po pobudzeniu włókien aferentnych i dzięki istnieniu włókien skrzyżowanych jest ono obustronne. Komórki słuchowe zewnętrzne są bardzo wrażliwe na działanie czynników uszkadzających ulegają uszkodzeniu w pierwszej kolejności. Wybiórcze zniszczenie komórek słuchowych zewnętrznych powoduje uszkodzenie słuchu rzędu 30–50 dB, zaś zniszczenie komórek słuchowych wewnętrznych powoduje całkowitą głuchotę.

Nerw słuchowy jest uformowany przez neurony zwoju spiralnego ślimaka. W obrębie nerwu słuchowego włókna nerwowe wykazują organizację tonotopową, co oznacza, że włókna odpowiedzialne za przewodzenie informacji o poszczególnych częstotliwościach są zgrupowane razem. Podobna organizacja tonotopowa występuje na wyższych piętrach układu słuchowego w mózgu: jądrze ślimakowym, jądrze górnym oliwki, jądrach wstęgi bocznej, wzgórkia dolnego i ciała mankowatego przyśrodkowego. Integracja obustronna występuje na dolnym poziomie zespołu jąder oliwki. Lokalizacja bodźców słuchowych występuje na górnym poziomie zespołu jąder oliwki.

Ośrodek korowy dla słuchu znajduje się w zakrętach skroniowych poprzecznych. Również w ośrodkach korowych istnieje organizacja tonotopowa. Kora słuchowa dzieli się na pierwszorzędową i drugorzędową. Pierwszorzędowa kora słuchowa znajduje się w tylnogórnjej części zakrętów skroniowych poprzecznych; w tym obszarze dokonywana jest ogólna analiza dźwięku w dziedzinie czasu i przestrzeni. Drugorzędowa kora słuchowa zwana jest korą kojarzeniową. Uważa się, że w okolicach I- i II-rzędowej kory słuchowej leżą obszary odpowiedzialne za bardziej złożoną interpretację wrażeń słuchowych. Kora słuchowa odpowiedzialna jest za złożoną interpretację dźwięków. Nawet całkowite zniszczenie kory słuchowej

chowej nie powoduje głuchoty; możliwe jest nawet rozróżnianie częstotliwości i natężeń dźwięku. Przy uszkodzeniach kory zaburzona lub niemożliwa staje się czasowa analiza dźwięku i jego lokalizacja.

Większość włókien drogi słuchowej jest skrzyżowana, to znaczy włókna ucha prawego biegną głównie do lewej półkuli mózgu i odwrotnie.

Dźwięk może docierać do komórek słuchowych drogą powietrzną, czyli poprzez ucho zewnętrzne i środkowe w warunkach fizjologicznych oraz drogą kostną (np. poprzez przyłożenie do kości czaszki drgającego obiektu, np. kamertonu). Uważa się, że słyszenie na drodze kostnej dźwięków o niskiej częstotliwości (<200 Hz) powstaje dzięki bezwładności płynów ucha wewnętrznego w stosunku do drgających kości czaszki. W przypadku dźwięków o wyższych częstotliwościach uważa się, że pobudzenie komórek słuchowych powstaje na skutek drgań błędniczka kostnego i zmian ciśnienia wywieranego przez drgającą kość na przestrzenie płynowe ucha wewnętrznego. Powoduje ono przepływ endolimfy i pobudzenie komórek słuchowych. Oba okienka (owalne z płytką strzemiączka i okrągłe) odgrywają tu rolę „amortyzatora”. Ściskanie płynów ucha wewnętrznego przez drgającą kość powoduje bowiem powstanie nacisku na oba okienka.

Przemieszczenie podstawy strzemiączka pod wpływem dźwięku powoduje ruch płynów ucha wewnętrznego, który odchyła błonę podstawną ku górze, powodując ugięcie rzęsek komórek słuchowych. Ugięcie rzęsek jest bodźcem, który wyzwała w komórkach słuchowych zewnętrznych procesy biochemiczne powodujące skurcz tych komórek, podobny do skurczu komórek mięśniowych. Skurcz komórek słuchowych zewnętrznych dodatkowo zwiększa wychylenie błony podstawnej i sprawia, że jest ono bardziej precyzyjne, to znaczy powstaje w miejscu, w którym znajdują się komórki odpowiedzialne za słyszenie danej częstotliwości. Czynność motoryczna komórek zewnętrznych powoduje wzmożony przepływ płynu w określonej części narządu Cortiego, wywołując ruch rzęsek komórek słuchowych wewnętrznych i w ten sposób ich pobudzenie. Pobudzenie komórek słuchowych wewnętrznych powoduje wydzielanie substancji chemicznych, dzięki którym powstaje bodziec w nerwie słuchowym. W ten sposób fala akustyczna jako bodziec mechaniczny zostaje zamieniona na bodziec elektryczny (zmiana potencjału elektrycznego nerwu słuchowego). Pobudzenie elektryczne jest przez nerw słuchowy przewodzone do wyższych ośrodków nerwowych w korze mózgowej, w której powstaje zrozumiałe dla człowieka wrażenie słuchowe.

Wszystkie wrażenia słuchowe mają pewne charakterystyczne właściwości (atrybuty), takie jak: wysokość, głośność czy lokalizację dźwięku, które można odnieść do fizycznych parametrów dźwięku. Najważniejsze atrybuty wrażenia słuchowego, jak wysokość czy głośność, opisywane są jako wielkości jednowymiarowe. Oznacza to, że spośród dużej liczby rozmaitych sygnałów o różnych wysokościach czy głośności słuchacz potrafi uporządkować wszystkie te dźwięki na skali wysokości od niskich do wysokich lub w skali od cichych do głośnych. Jednak w celu zidentyfikowania większej liczby cech niezbędne są dodatkowe wymiary.

Podkreśla się tu szczególnie cechy brzmienia dźwięku związane z rozkładem widmowym energii bodźca dźwiękowego oraz z przebiegiem czasowym bodźca.

Dźwięki spotykane w życiu codziennym w większości pochodzą z różnych źródeł i są dźwiękami złożonymi, włączając w to mowę ludzką, zawierają zatem wiele przebiegów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach, określonych amplitudach i względnych fazach. Te czynniki fizyczne wykorzystywane są w tak zwanej selekcji percepcyjnej, która ma na celu wyłonienie odpowiednich strumieni percepcyjnych. Układ słuchowy może rozłożyć sygnał akustyczny w taki sposób, że składowe docierające z każdego źródła są grupowane razem i formują część jednego strumienia percepcyjnego. Każdemu źródłu można więc przypisać własną wysokość, głośność, barwę i położenie. Dźwięk złożony jest analizowany w ramach strumieni percepcyjnych, tak więc człowiek może zwracać uwagę na jeden strumień w danym czasie. Zatem strumień, który przyciąga naszą uwagę, wyróżnia się percepcyjnie, zaś reszta sygnału ma znaczenie mniejsze. Według niektórych badaczy na formowanie się strumieni percepcyjnych wpływa uwaga słuchowa. Człowiek może słuchać selektywnie, próbując usłyszeć wysokie czy niskie tony, lub też może próbować usłyszeć je razem. Naukowcy podkreślają, że zdolność do kierowania uwagi na jeden spośród wielu strumieni, a przede wszystkim do formowania strumieni jako pierwszego kroku w analizie bodźca akustycznego, nie zależy wyłącznie od informacji zawartej w fali akustycznej. Przytacza się tutaj tak zwany efekt *cocktail party*, kiedy to pojawia się zdolność selektywnego zwracania uwagi na przebieg tylko jednej z wielu konwersacji. Wówczas można z powodzeniem poążać za konwersacją, jeśli jej temat różni się od tematów innych rozmów.

W PŁYW BODŹCÓW DŹWIĘKOWYCH NA ORGANIZM CZŁOWIEKA

Efekty działania bodźców dźwiękowych na organizm człowieka zależą od ich rodzaju, siły i czasu trwania. Istotny wpływ ma również szereg czynników indywidualnych, jak na przykład wiek czy stan zdrowia osoby, na którą te bodźce działają. Najbardziej spektakularnymi sytuacjami dla drogi słuchowej i całego organizmu człowieka będą dwie przeciwstawne sytuacje akustyczne, a mianowicie cisza, która oznacza całkowitą izolację od bodźców dźwiękowych, a z drugiej strony – hałas.

Słyszenie jest złożonym i dynamicznym procesem, w którym przy prawidłowej czułości słuchu sygnał akustyczny jest automatycznie analizowany i przetwarzany na różnych piętrach ośrodkowego układu słuchowego. W sytuacji, gdy jeden lub kilka elementów tej skomplikowanej sieci procesów nie działa efektywnie, mamy do czynienia z różnego rodzaju zaburzeniami słuchowymi. Jeżeli problemy w przetwarzaniu i analizie dźwięków mowy mają znaczne nasilenie i występują na wczesnym etapie rozwoju dziecka, mogą być przyczyną opóźnionego lub zaburzonego rozwoju mowy. Najczęściej jednak różnego typu centralne zaburzenia słuchu ujawniają się w przedszkolu lub w pierwszych klasach szkoły podstawowej, kiedy to

gwałtownie rosną wymagania stawiane zmysłowi słuchu. W tym czasie ogromne znaczenie dla możliwości nauki i przyswajania wiedzy kanałem słuchowym mają takie umiejętności słuchowe, jak: rozumienie mowy w hałasie, pamięć słuchowa, słuch fonematyczny i uwaga słuchowa. W wielu przypadkach trudności w nauce, trudności w pisaniu i czytaniu oraz często współistniejące z nimi zaburzenia emocjonalne wynikają właśnie z trudności słuchowych dziecka.

U niektórych dzieci zaburzenia przetwarzania słuchowego są właśnie wynikiem braku właściwej stymulacji układu słuchowego we wczesnym dzieciństwie. Brak właściwej stymulacji akustycznej i/lub językowej może być również wynikiem zaniedbań środowiskowych. Występujące wówczas zaburzenia wyższych funkcji słuchowych są wynikiem tak zwanej deprywacji słuchowej. Wiadomo bowiem, że prawidłowy rozwój słuchowy dziecka uwarunkowany jest bodźcami dźwiękowymi, dostarczonymi już w życiu prenatalnym, a później na każdym etapie jego rozwoju, które to bodźce stymulują drogę słuchową i pozwalają na odpowiednią organizację struktur mózgowych umożliwiających rozwój adekwatnych zachowań słuchowych. Przez całe nasze życie dostarczanie odpowiedniego materiału akustycznego jest niezbędne i niezwykle ważne dla rozwoju i kształtowania zachowań słuchowych człowieka.

Cisza jest sytuacją ekstremalną, która polega na całkowitym odcięciu człowieka od zewnętrznego strumienia akustycznego. Wymiar nieprawidłowych reakcji i również konsekwencji przebywania w ciszy reguluje przede wszystkim czas ekspozycji. Brak stymulacji słuchowej w krótkim czasie może być odbierany pozytywnie, jako czas relaksu, porządkowania natłoku myśli czy budowania wewnętrznej harmonii. Niestety w dłuższym wymiarze doprowadza jednak do niekorzystnego dla człowieka zjawiska deprywacji sensorycznej. Deprywacja sensoryczna, która polega na zamierzonej redukcji lub usunięciu bodźców dźwiękowych działających na narząd słuchu, stosowana jest z powodzeniem w medycynie alternatywnej i eksperymentach psychologicznych. Publikacje na ten temat pokazują, że terapia ta pomaga zniwelować ból i stres. Stan relaksacji, w którym znajduje się pacjent, sprawia, że obniża się ciśnienie krwi, a istotnie poprawia krążenie krwi w obrębie narządów i tkanek całego organizmu. Chociaż krótkotrwała deprywacja może być dla organizmu relaksująca, to jednak długotrwała może prowadzić do skrajnego niepokoju, halucynacji, natłoku myśli, zaburzeń emocjonalnych, depresji oraz zachowań społecznych.

Przeciwieństwem stanu ciszy dla układu słuchowego jest niewątpliwie hałas, który odbieramy jako dźwięki zbyt głośne, uciążliwe, przykre i zwykle szkodliwe. Hałas może być szkodliwy dla zdrowia człowieka, ponieważ jego zbyt duże natężenie prowadzi do uszkodzenia narządu słuchu. Mniejsze wartości natężenia hałasu, lecz występujące długotrwale przy nieodpowiednim widmie akustycznym (np. zbyt wysokim lub zbyt niskim), a także drażniące w inny sposób (np. jednostajny, przenikliwy, rozpraszający), mogą wpływać negatywnie na psychikę. Im dokuczliwość dźwięku jest większa i dłuższa, tym poważniejsze są konsekwencje,

połączony od stanów zdenerwowania, poprzez agresywność, po depresje i zaburzenia psychiczne. Efektem nadmiernego hałasu jest czasowe podniesienie się progu słyszenia, czyli okresowa utrata czułości słuchu. Powtarzające się epizody gorszego słyszenia mogą prowadzić do trwałych uszkodzeń słuchu. Podwyższenie progu może być odwracalne lub trwałe. Spowodowany hałasem obustronny trwały ubytek słuchu typu ślimakowego, wyrażony podwyższeniem progu słyszenia o wielkości co najmniej 45 dB w uchu lepiej słyszącym, obliczony jako średnia arytmetyczna dla częstotliwości audiometrycznych 1, 2 i 3 kHz, stanowi kryterium rozpoznania i orzeczenia zawodowego uszkodzenia słuchu, jako choroby zawodowej.

obustronny trwały ubytek słuchu typu ślimakowego doprowadza do inwalidztwa i znajduje się on na czołowym miejscu na liście chorób zawodowych.

Pozasłuchowe skutki działania hałasu są tematem licznych badań, lecz nadal są trudne do opisanego. Anatomiczne połączenie nerwowej drogi słuchowej z korą mózgową umożliwia bodźcom słuchowym oddziaływanie na inne ośrodki w mózgowiu (zwłaszcza ośrodkowy układ nerwowy i układ gruczołów wydzielania wewnętrznego), a w konsekwencji – na stan i funkcje wielu narządów wewnętrznych.

okazuje się, że bodźce akustyczne o poziomie 55–75 dB mogą powodować rozproszenie uwagi, utrudniać pracę i zmniejszać jej wydajność, natomiast przekroczenie poziomu bodźca powyżej 75 dB może powodować wyraźne zaburzenia funkcji fizjologicznych organizmu. Zatem można stwierdzić, że pozasłuchowe skutki działania hałasu są uogólnioną odpowiedzią organizmu na działanie hałasu jako stresora przyczyniającego się do rozwoju różnego typu chorób: choroby nadciśnieniowej, choroby wrzodowej, nerwic i innych.

Wśród skutków działania wszechobecnego hałasu należy jeszcze wymienić jego wpływ na zrozumiałość i maskowanie mowy, a nawet dźwiękowych sygnałów bezpieczeństwa. W różnych miejscach pracy utrudnione porozumiewanie się w hałasie i maskowanie sygnałów ostrzegawczych zwiększa uciążliwość warunków pracy i zmniejsza jej wydajność, ale przede wszystkim zagraża bezpieczeństwu i stanowi częstą przyczyną wypadków.

PODSUMOWANIE

Cisza nie jest sprzymierzeńcem narządu słuchu, ponieważ jego prawidłowy rozwój determinuje stały dopływ odpowiednich bodźców dźwiękowych. Cisza nie jest też sprzymierzeńcem komunikowania się ludzi za pomocą symboli słownych. Brak dopływu pobudzenia dźwiękowego będzie zaburzał te i wiele innych funkcji, w tym poznawczych, które są niezbędne w rozwoju każdego człowieka. Stymulacja dźwiękami z zewnątrz jest konieczna do rozwoju i ukształtowania drogi słuchowej oraz właściwej specjalizacji neuronalnej w mózgu. W warunkach ciszy zaburzona zostaje kontrola nad wytwarzaniem własnego głosu i przekazów ustnych, utrudnione jest porozumiewanie się ludzi. Szczególnie ważne będzie to dla osób pracujących głosem, zwłaszcza dla osób ze środowisk artystycznych, w tym wokalistów.

Należy zdawać sobie również sprawę, że do pewnych poziomów dźwięków dobiegających z zewnątrz można się przyzwyczaić; nazywa się to adaptacją sensoryczną. To przyzwyczajenie jednak nie oznacza rozwiązania problemu. Otaczająca nas dzisiaj rzeczywistość charakteryzuje się różnorodnością bodźców akustycznych, które w odmienny sposób oddziałują na nasz organizm. Ale ta sama rzeczywistość wypracowała u nas coraz lepszą świadomość i umiejętność zdefiniowania, jaki jest wpływ uwarunkowań zewnętrznych na nasze zdrowie, jak należy je interpretować i chronić się przed nimi. Ważne zatem jest posiadanie podstawowej wiedzy, która pozwoli nam odpowiedzieć na pytanie, czy dźwięki dobiegające z zewnątrz są pożądane przez nas, czy też mają znamiona szkodliwego dla zdrowia hałasu. Warto wiedzieć, w jaki sposób niekorzystne warunki akustyczne wpływają na nasze zdrowie i jakość naszego codziennego życia.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- Anisfeld, A. M. (1984). *Language Development from Birth to Three*, Erlbaum, Hillsdale, New York.
- Bellis, T. J. (2003). *Assessment and management of central auditory processing disorders in the educational setting: from science to practice*, Cengage Learning.
- Hepper, P. G. (1992). *Fetal psychology*, w: *Fetal Behaviour. An embryonic science. Developmental and perinatal aspects*, J. G. Nijhuis (red.), Oxford University Press, Oxford, s. 129–156.
- Kornas-Biela, D. (1993). *Kształtowanie się zdolności słuchowych w prenatalnym okresie rozwoju dziecka*, Opuscula Logopaedica in honorem Leonis Kaczmarek, UMCS, Lublin, s. 143–158.
- Kornas-Biela, D. (2001). *Okres prenatalny*, w: *Psychologia rozwoju człowieka*, B. Harwas-Napierała, J. Trempała (red.), t. 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 17–46.
- Moore, B. C. J. (1999). *Wprowadzenie do psychologii słyszenia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Nęcka, E., Orzechowski, J., Szymura, B. (2006). *Psychologia poznawcza*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Palmer, A. R. (1995). *Neural Signal Processing*, w: *Hearing (Handbook of perception and cognition*, 2nd ed.), B. C. J. Moore (red.), Academic Press, San Diego, s. 75–125.
- Pruszwicz, A. (red.) (2003). *Audiologia kliniczna – zarys*, Wydawnictwa AM, Poznań.
- Spreen, O. (1984). *Human Developmental Neuropsychology*, Oxford University Press, New York, s. 38–39.
- Stefańska-Klar, R. (oprac.) (2000). *Późne dzieciństwo. Młodszy wiek szkolny*, w: *Psychologia rozwoju człowieka*, B. Harwas-Napierała, J. Trempała (red.), t. 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 131–155.

- Freilau, J., Doliński, D. (2008). *Psychologia – podręcznik akademicki*, cz. I i II, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.
- Moore, L. P. A. S. van (1975). *Temporal coherence in the perception of tone rate sequences*, Ph.D. Thesis, Institut for Perception Research, Technische Hogeschool, Eindhoven.
- Stagner, L. A. (2007). *Issues in human auditory development*, Journal of Communication Disorders, 40 (4), s. 275–283.

Magdalena Szkiełkowska – lekarz otolaryngolog, audiolog i foniatra. Kierownik Kliniki Audiologii i Foniatrii Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu w Warszawie oraz adiunkt w Katedrze Audiologii i Foniatrii Uniwersytetu Muzycznego Fryderyka Chopina w latach 2002–2018. Od 2008 konsultant wojewódzki na Mazowszu w dziedzinie audiologii i foniatrii. Jest autorem i współautorem ponad stu dwudziestu publikacji medycznych o zasięgu krajowym i międzynarodowym oraz autorem monografii. Uczestniczy w realizacji wielu projektów naukowo-badawczych z dziedziny patofizjologii procesu komunikatywnego oraz w pracy dydaktycznej w zakresie szkolenia lekarzy, studentów i specjalistów dyscyplin pokrewnych. Jest wykładowcą na kierunku Logopedia z audiologią oraz na Podyplomowych Studiach Surdologopedii. Od wielu lat jest kierownikiem specjalizacji lekarzy szkolących się w dziedzinie Audiologii i Foniatrii oraz kierownikiem kursów specjalizacyjnych organizowanych we współpracy z CMKP dla lekarzy specjalizujących się w zakresie audiologii i foniatrii oraz kursów doszkalających dla logopedów, psychologów i pedagogów.

- otolaryngologist, audiologist and phoniatician. She is the head of the Department of Audiology and Phoniatics at the Institute of Physiology and Pathology of Hearing in Warsaw and assistant professor at the Department of Audiology and Phoniatics at the Chopin University of Music in 2002–2018. Since 2008, Provincial Consultant in Mazovia in the field of Audiology and Phoniatics. Author and co-author of over one hundred and twenty national and international medical publications and the author of monographs. Participates in the implementation of many scientific and research projects in the field of the pathophysiology of the communicative process and in didactic work in the field of training of students, physicians and related disciplines specialists. She is a lecturer in the field of Logopedia with Audiology and postgraduate Study Surdologopedia. For many years she has been the head of the specialization courses of doctors trainings in the field of Audiology and Phoniatics and the head of specialization courses organized in cooperation with CMKP for doctors specializing in Audiology and Phoniatics and supplementary courses for logopedists, psychologists and pedagogues.

Henryk Skarżyński – otolaryngolog, specjalista z otorynaryngologii, audiologii, foniatrii i otolaryngologii dziecięcej. Konsultant krajowy ds. otorynaryngologii. Pierwszy w Polsce wszczepił implanty: ślimakowe, do pnia mózgu, ucha środkowego. W 2002 opracował pierwszy w świecie program leczenia częściowej

głuchoty u dorosłych, w 2004 – u dzieci. Metoda ta, nazwana „metodą Skarżyńskiego”, została wdrożona w kilkunastu światowych ośrodkach. Inicjator, organizator i dyrektor resortowego Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu i Światowego Centrum Słuchu. Od 16 lat wykonuje najwięcej w świecie operacji poprawiających słuch. Inicjator europejskich konsensusów naukowych i badań przesiewowych w Azji, Europie, Afryce i Ameryce Południowej. Autor i współautor ponad 1000 publikacji i ponad 3000 międzynarodowych doniesień kongresowych. Członek kilkudziesięciu najważniejszych krajowych i zagranicznych towarzystw naukowych. Laureat ponad 150 odznaczeń, wyróżnień państwowych polskich i zagranicznych, środowiska medycznego, kościelnego, gospodarczego i kulturalnego. Wygrał plebiscyt na „Człowieka Wolności” w kategorii nauka w 2014 r. Doktor h.c. trzech uniwersytetów i profesor honorowy trzech uniwersytetów zagranicznych.

- otosurgeon, specialist in otorhinolaryngology, audiology, phoniatrics, and pediatric otolaryngology. National Consultant for Otorhinolaryngology. As a first in Poland, he placed implants into cochlea, brainstem and middle ear. In 2002, he developed the world's first partial deafness treatment program for adults, and in 2004 – for children. This method, called the "Skarżyński Method", has been implemented in several world centers. Initiator, organizer, and director of the departmental Institute of Physiology and Pathology of Hearing and the World Hearing Center. For 16 years, he has been performing most of the operations in the world which improve hearing. The initiator of European scientific consensuses and screening researches in Asia, Europe, Africa, and South America. Author and co-author of over 1000 publications and over 3000 international congress reports. A member of dozens of the most important national and foreign scientific societies. Laureate of over 150 decorations, Polish and foreign state distinctions, medical, church, economic and cultural environments. He won the plebiscite for "Man of Freedom" in the science category in 2014. Doctor honoris causa of three universities and honorary professor of three foreign universities.

Ewa Kazanecka – dr n. med., absolwentka Wydziału Lekarskiego Akademii Medycznej w Białymstoku, otolaryngolog, audiolog i foniatra. Wieloletni pracownik naukowy i dydaktyczny Katedry Audiologii i Foniatrii Uniwersytetu Muzycznego Fryderyka Chopina. Działalność kliniczną realizuje w specjalistycznych poradniach laryngologicznych i foniatrycznych. Specjalizuje się w diagnostyce i leczeniu zaburzeń głosu mówionego i śpiewaczego. Autorka metody terapii zaburzeń głosu Rytmiczno-Ruchowej Rehabilitacji Głosu oraz adaptacji Metody Akcentów do prozodii języka polskiego. W swoim dorobku ma wiele publikacji z dziedziny foniatrii, w tym książkę *Emisja głosu, kompendium metodologiczne* oraz pracę doktorską *Elektrolaryngograficzne (ELG) badania fonacyjnej czynności krtani w warunkach fizjologicznych i patologicznych*.

- Ph.D. in Medicine. She is a graduate of the Faculty of Medicine at the Medical Academy in Białystok. Otolaryngologist, audiologist and phoniatrist. A long-time research and teaching worker at the Department of Audiology and Pho-

niatrics at the Chopin University of Music. Performs her clinical activities in specialistic laryngology and phoniatic clinics. Specializes in the diagnosis and treatment of voice disorders in speech and singing. The author of the method of therapy of voice disorders – the Voice Rhythmic-Movement Rehabilitation and the author of adaptation of the Accents Method to Polish language prosody. She has published many publications in the field of phoniatics, including the book *Voice emission, methodological compendium* and a doctoral dissertation entitled *Electrolaryngographic (ELG) examination of phonational activity of larynx in physiological and pathological conditions*.

Agneszka Kurowska-Janecka – absolwentka Wydziału Wokalno-Aktorskiego Akademii Muzycznej im. Fryderyka Chopina (dyplom z wyróżnieniem) i Podyplomowych Studiów Logopedii i Pragmatyki Komunikacji na Akademii Pedagogiki Specjalnej. Zaśpiewała ponad 40 partii operowych i koncertów w większości krajów Europy, w Indiach, Izraelu, Japonii i Libanie. W latach 2009–2018 pracownik naukowy Katedry Audiologii i Foniatrii. Prowadzi trening czynności głosotwórczych, terapię logopedyczną i uczy technik wokalnych w mowie i śpiewie. Organizuje kursy emisji głosu. Bierze udział w projektach badawczych i konferencjach naukowych. Ma na swym koncie szereg publikacji naukowych. Prezes Falenickiego Towarzystwa Kulturalnego i kierownik artystyczny Falenickich Koncertów Letnich. Członek zarządu Mazowieckiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Logopedycznego oraz Polskiego Stowarzyszenia Pedagogów Śpiewu. Odznaczona „Złotym Krzyżem Zasługi RP” i odznaką Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego „Zasłużony dla Kultury Polskiej”.

a graduate of the Vocal and Acting Department at the Chopin Academy of Music (diploma with honours) and post-graduate studies in speech therapy and communication pragmatics at The Maria Grzegorzewska University. She has sung over 40 operatic parts and concerts in most countries in Europe, in India, Israel, Japan, and Lebanon. In the years 2009–2018 she was a research worker at the Department of Audiology and Phoniatics. She conducts training in voice creation activities, speech therapy and teaches vocal techniques in speech and singing. Organizes voice emission courses. Participates in research projects and scientific conferences. She has a number of scientific publications on her account. President of the Falenica Cultural Society and artistic manager of the Falenica Summer Concerts. Member of the board of the Mazovian Division of the Polish Logopedic Society and the Polish Voice Teachers Association. Awarded with the Golden Cross of Merit of the Republic of Poland and the Decoration of Honour Meritorious for Polish Culture of the Polish Ministry of Culture and National Heritage.

Tomasz Wolak¹, Katarzyna Cieśla¹, Artur Lorens¹,
Agata Szkiełkowska^{1,2}, Henryk Skarżyński^{1,2}

¹Światowe Centrum Słuchu, Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu,
Warszawa/Kajetany

²Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina (do 2018)

CZY NEURONY LUBIĄ CISZĘ?

Układ słuchowy człowieka jest najbardziej złożonym układem zmysłowym ze wszystkich. Składa się z elementów ucha oraz ośrodkowej drogi słuchowej. Kora słuchowa znajduje się w górnym zakręcie płata skroniowego mózgu. Wyróżnia się tak zwaną „pierwotną” korę słuchową, która działa jak mikrofon i rejestruje wszystkie dźwięki, które dochodzą do naszych uszu. Pierwotna kora słuchowa łączy się dalej z obszarami tak zwanej „drugorzędowej (wtórnej)” kory słuchowej, w której następuje dalsze przetwarzanie informacji słuchowej oraz z obszarami skojarzeniowymi, integrującymi bodźce wielozmysłowe. Aktywność kory słuchowej odzwierciedla cechy słyszanych dźwięków, takie jak częstotliwość i intensywność. Mapowanie organizacji tonotopowej kory słuchowej [łac. *tono* – dźwięk, *topic* – miejsce] wiąże się z wyznaczeniem obszarów, których aktywność związana jest z reakcją na różne częstotliwości słyszanych dźwięków. Organizacja ta zachowana jest na całej długości drogi słuchowej, począwszy od tzw. ślimaka w uchu wewnętrznym. Ślimak cechuje się tym, że poszczególne jego odcinki reagują preferencyjnie na różne częstotliwości dźwięku. Aktywność kory słuchowej, w tym organizacja tonotopowa, może być zmieniona w przypadku, gdy osoba cierpi na niedosłuch i/lub jest narażona na głośne dźwięki. Metodą optymalną do badania wielkości, lokalizacji i kształtu pobudzenia kory słuchowej w różnych populacjach jest nieinwazyjna technika czynnościowego rezonansu magnetycznego (fMRI, *functional magnetic resonance*).

Autorzy przedstawiają, w jaki sposób mózg przetwarza dźwięki o różnej częstotliwości i intensywności, począwszy od ciszy, a skończywszy na dźwiękach sprawiających ból. Opisują ponadto różnice w pracy mózgu osoby pozbawionej stymulacji słuchowej od urodzenia oraz mózgu osoby, której słuch uległ uszkodzeniu w późniejszym okresie życia, a także aktywność mózgu w odpowiedzi na nadmierne obciążenie słuchowe. Dyskusję badań własnych poprzedza wstęp dotyczący organizacji układu słuchowego u człowieka oraz podstaw działania metody fMRI.

Słowa kluczowe: kora słuchowa, czynnościowy rezonans magnetyczny, neuroobrazowanie, organizacja tonotopowa, droga słuchowa, zmysł słuchu

DO NEURONS LIKE SILENCE?

The human auditory system is the most complex sensory system of all. It is composed of the ear parts and the central auditory pathway. The auditory cortex is located in the superior gyrus of the temporal lobe of the brain. There is the *primary auditory cortex* that acts like a microphone and records all the sounds that arrive at our ears. The primary auditory cortex connects to the *secondary auditory cortex* in which further processing of auditory information occurs, and to association brain areas which integrate multisensory stimulation. The responses of the auditory cortex reflect features of the perceived sounds, such as frequency and intensity. The mapping of the *tonotopic organization* of the auditory cortex [Lat. *tono* – sound, *topic* – place] involves the designation of areas whose activity is related to the response to the various frequencies of audible sounds. This organization is preserved along the whole auditory pathway, starting at the cochlea in the inner ear. A characteristic feature of the cochlea is that it preferentially reacts to different sound frequencies along its length. Activation of the auditory cortex, including the tonotopic organization, may be altered in people with hearing impairments and/or those exposed to excessive noise. The optimal technique to assess the size, location and shape of responses of the auditory cortex in various populations is the non-invasive method of functional magnetic resonance (fMRI).

The authors will show how the brain processes sounds of various frequency and intensity, starting from silence to the threshold of pain level. They further present the differences in the functioning of the brain of a person without any auditory experience from birth and of a person whose hearing was damaged at a later stage of life, as well as the brain responses in cases of excessive auditory load. The discussion of their own studies is preceded by an introduction to the organization of the human auditory system and the method of fMRI.

Key words: auditory cortex, functional magnetic resonance, neuroimaging, tonotopic organization, auditory pathway, sense of hearing

WSTĘP

Dźwięki, które nas otaczają, odbieramy poprzez układ słuchowy. Powszechnie mówi się, że słyszy nasze ucho, jednak w rzeczywistości „słyszy” nasz mózg. Oczywiście bez ucha i całej drogi słuchowej nie usłyszymy żadnego dźwięku, ale to nasz mózg rozpoznaje rodzaj dźwięku i odpowiednio na niego reaguje. Kora słuchowa znajduje się w górnym zakręcie płata skroniowego mózgu. Jej podstawowym elementem jest tak zwana pierwotna kora słuchowa, która działa jak mikrofon i rejestruje wszystkie dźwięki dochodzące do naszych uszu. Ślimak w uchu wewnętrznym cechuje się tym, że poszczególne jego odcinki reagują specyficznie na różne częstotliwości. Wszystko wskazuje na to, że podobna organizacja występuje w obszarze pierwotnej/pierwszorzędowej kory słuchowej. Mapowanie organizacji tonotopowej kory słuchowej za pomocą metody czynnościowego rezonansu ma-

genetycznego (ang. *functional magnetic resonance imaging*, fMRI) wiąże się z wyznaczeniem obszarów, których aktywność reprezentuje reakcję na różne częstotliwości słyszanych dźwięków. Cechy dźwięku, takie jak częstotliwość (ale także intensywność, czas trwania itp.), są wykrywane w tak zwanej drugorzędowej (wtórnej) korze słuchowej, z którą łączy się bezpośrednio pierwotna kora słuchowa. Tu wyróżnia się między innymi region odpowiedzialny za rozumienie mowy (obszar Wernickego). Dzięki metodom obrazowania¹ możemy więc ocenić, w jaki sposób mózg osoby z prawidłowym słuchem przetwarza dźwięki i jak neurony kodują intensywność dźwięku, począwszy od ciszy, a skończywszy na dźwiękach sprawiających ból. Ponadto, jak wskazują badania, czynność mózgu osoby poddawionej stymulacji słuchowej oraz mózgu poddanego nadmiernemu obciążeniu słuchowemu istotnie się zmienia.

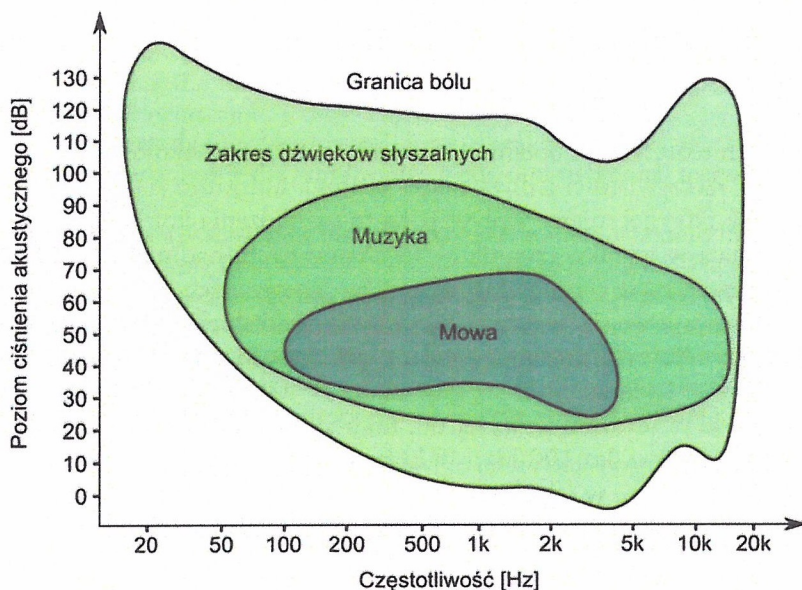
ZMYŚŁ SŁUCHU

Ludzki słuch teoretycznie obejmuje dźwięki z zakresu od około 20 Hz do blisko 20 kHz. W rzeczywistości jednak zakres czułości ludzkiego słuchu jest znacznie mniejszy. W głównej mierze wpływają na to uszkodzenia komórek słuchowych, które powstają w wyniku czynników mechanicznych, nadmiernego hałasu, jak również w następstwie chorób oraz czynników genetycznych. Ponadto wraz z wiekiem słuch stopniowo się pogarsza. Niestety komórki słuchowe nie regenerują się. Osoby z prawidłowym słuchem w wieku kilkunastu lat słyszą przeciętnie w zakresie 30 Hz – 18 kHz, podczas gdy osoby w wieku 30–50 lat – w zakresie 60 Hz – 14 kHz. U osób powyżej 60. roku życia przedział słyszalnych dźwięków obejmuje już tylko 100 Hz – 8 kHz i nadal się zawęża. Dużo oczywiście zależy od środowiska, w jakim dana osoba przebywa i na jakie dźwięki, w tym hałas, narażona jest w ciągu swojego życia.

Większość dźwięków istotnych dla naszego funkcjonowania mieści się w przedziale 100 Hz – 8 kHz. Są to przede wszystkim dźwięki mowy, jak również dźwięki większości instrumentów muzycznych (rys. 1). Najniższe i najwyższe częstotliwości są słyszane ciszej niż częstotliwości ze środkowego przedziału, co wynika z cech budowy drogi słuchowej. Ponadto człowiek słyszy dźwięki w określonym zakresie intensywności, to jest od 0 do 120 decybeli (dB; próg bólu). Ciśnienie akustyczne, które reprezentuje poziom odniesienia (próg czułości słuchu) wynosi 20 μPa , co odpowiada natężeniu dźwięku 10^{-12} W/m^2 . Co 6 dB następuje podwojenie intensywności, a wzrost o 20 dB oznacza dziesięciokrotnie głośniejszy dźwięk. Uważa

¹ Wśród metod obrazowania stosowanych do badań drogi słuchowej można wyróżnić, poza wspomnianą techniką fMRI, badania Pozytonowej Tomografii Emisyjnej (ang. *Positron Emission Tomography*, PET), badania spektroskopii optycznej bliskiej podczerwieni (ang. *Near Infrared Spectroscopy*, NIRS), a także techniki z użyciem wielokanałowej elektroencefalografii (EEG) oraz magnetoencefalografii (MEG).

się, że dźwięki o intensywności poniżej 20 dB są bardzo ciche, jednakże wszystko zależy od otoczenia, w jakim znajduje się dana osoba. Ponadto, mimo iż zakres dynamiki słyszenia wynosi dla ludzkiego słuchu aż 120 dB, nie oznacza to, że jednocześnie możemy usłyszeć lecącego komara oraz startujący odrzutowiec. Rzeczywista dynamika słyszenia w naturalnych warunkach to około 40–60 dB. Przykładowo, człowiek żyjący w mieście w praktyce bardzo rzadko doświadcza zupełnej ciszy (<20 dB). Tego typu warunki można wytworzyć jedynie w specjalnych komorach ciszy, kabinach bezpogłosowych lub zakładając dobrej jakości ochronniki słuchu w cichym pomieszczeniu. Należy również pamiętać, że dźwięki docierają do mózgu nie tylko poprzez uszy (przewodnictwo powietrzne), lecz także przez tak zwane przewodnictwo kostne, tj. za pośrednictwem drgań kości czaszki.

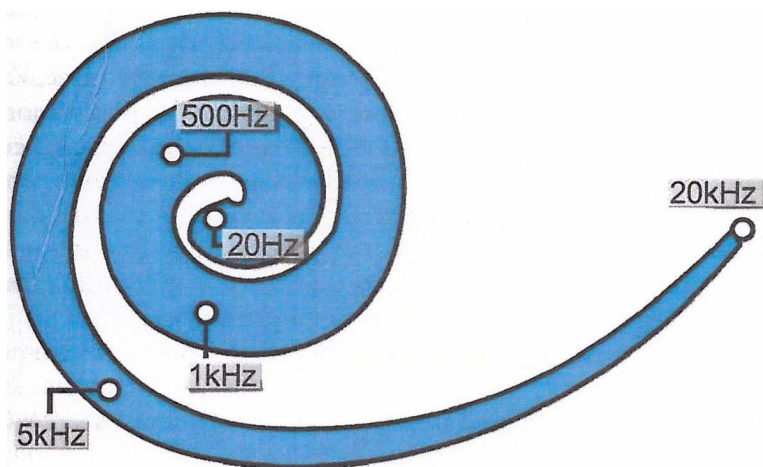


Rys. 1. Zakres czułości słyszenia zdrowego młodego człowieka [Wikipedia, 2017].

DZIAŁANIE DROGI SŁUCHOWEJ

Układ nerwowy przetwarza informacje zmysłowe w sposób hierarchiczny. Większość informacji przekazywana jest z odpowiednich receptorów znajdujących się na peryferiach układu (np. z opuszki węchowej, pręcików i czopków na siatkówce oka, itd.), poprzez wzgórze, do ośrodków pierwszorzędowych w korze mózgu. Każdemu zmysłowi odpowiada konkretny obszar mózgu, w którym następuje mapowanie informacji z receptorów z zachowaniem topologii tych receptorów.

Droga słuchowa to bardzo złożony układ. Dźwięk najpierw dociera do małżowiny usznej, a następnie przez przewód słuchowy do błony bębenkowej. Za pośrednictwem błony fala akustyczna przekształcana jest w drgania mechaniczne. W dużym uproszczeniu dźwięki są następnie wzmacniane poprzez drgania kosteczek słuchowych w uchu środkowym, aż wreszcie trafiają do ucha wewnętrznego, do ślimaka. Wzdłuż ślimaka rozłożone są komórki rzęsate wewnętrzne i zewnętrzne, które wchodzi w skład narządu Cortiego. Drgania mechaniczne, które rozchodzą się w płynie (endolimfie) wzdłuż ślimaka, pobudzają komórki rzęsate, które połączone są z zakończeniami nerwu ślimakowego. Budowa ślimaka sprawia, że komórki rzęsate w zależności od swojego położenia reagują na różne częstotliwości drgań mechanicznych – właściwość tę nazywa się organizacją tonotopową ślimaka. Najniższe częstotliwości dźwięku kodowane są przez komórki rzęsate wewnętrzne w okolicach szczytu ślimaka, a najwyższe – przy jego podstawie (rys. 2).



Rys. 2. Organizacja tonotopowa ślimaka w uchu wewnętrznym; 20 kHz to wejście do ślimaka w jego podstawie, 20 Hz to szczyt ślimaka [wg IFPS, 2014].

Nerw ślimakowy (część nerwu przedsionkowo-ślimakowego, tj. nerwu VIII) zachowuje tonotopowy charakter przewodzenia impulsów, bowiem każda z komórek nerwowych wchodząca w skład nerwu ślimakowego (jest ich 20–30 tysięcy) odpowiada za kodowanie określonej częstotliwości. Organizacja ta jest zachowana na wszystkich kolejnych piętrach drogi słuchowej, począwszy od jąder ślimakowych, jąder oliwki, wzgórków dolnych (w pniu mózgu), ciała kolankowatego przyśrodkowego we wzgórzu, aż do pierwotnej kory słuchowej w okolicy zakrętu Heschla w płatach skroniowych mózgu.

Ośrodki zmysłowe znajdujące się w określonej półkuli mózgu otrzymują informację zmysłową pochodzącą przede wszystkim z przeciwnej strony ciała, tj. na przykład kora słuchowa w lewej półkuli mózgu otrzymuje informacje pochodzące przede wszystkim z prawego ucha.

Informacje, które docierają do pierwszorzędowych/pierwotnych ośrodków mózgowych, przetwarzane są dalej przez ośrodki drugo- i trzeciorzędowe. Ośrodki drugorzędowe są przede wszystkim unimodalne (jednozmysłowe) i wyspecjalizowane w wyszukiwaniu charakterystycznych cech informacji. Przykładowo, w ośrodku Wernickego wykrywana jest informacja słuchowa zawarta w dźwiękach mowy, (tj. fonemach). Ośrodki te przez całe życie podlegają procesom uczenia się oraz coraz wyższej specjalizacji.

Ośrodki trzeciorzędowe – asocjacyjne/skojarzeniowe – łączą informacje docierające do mózgu z wielu zmysłów (np. dźwięk i wibracje budzika albo telefonu) i pozwalają zapisać lub odtworzyć z pamięci ich znaczenie. Uczenie polega na kodowaniu w pamięci charakterystycznych wzorców informacji dostarczanych przez zmysły [Cieśla i in., 2019]. W procesie tym dużą rolę odgrywa uwaga, motywacja, emocje oraz kontekst, w którym prezentowano informację. Wzorce istotne dla naszego funkcjonowania są lepiej zapamiętywane i szybciej odtwarzane. Zdolność układu nerwowego – w tym układu słuchowego – do ulegania zmianom czynnościowym i strukturalnym pod wpływem doświadczenia określa się terminem „neuroplastyczność”. Mózg jest najbardziej plastyczny w dzieciństwie, ale zachowuje zdolność uczenia się przez całe życie.

Podsumowując, powstanie tak zwanego wrażenia słuchowego wymaga nie tylko sprawnego zmysłu słuchu oraz drogi, którą informacje docierają do mózgu, lecz także prawidłowego przetwarzania tej informacji przez mózg.

METODA CZYNNOŚCIOWEGO REZONANSU MAGNETYCZNEGO W BADANIACH SŁUCHU

Wśród wielu technik badania sprawności słuchu można wyróżnić zarówno metody obiektywne, które nie wymagają współpracy osoby badanej – np. pomiary elektrofizjologiczne, tj. pomiar potencjałów wywołanych z pnia mózgu, jak i metody subiektywne (np. audiometria tonalna lub słowna), dzięki którym mierzone jest subiektywne wrażenie osoby badanej.

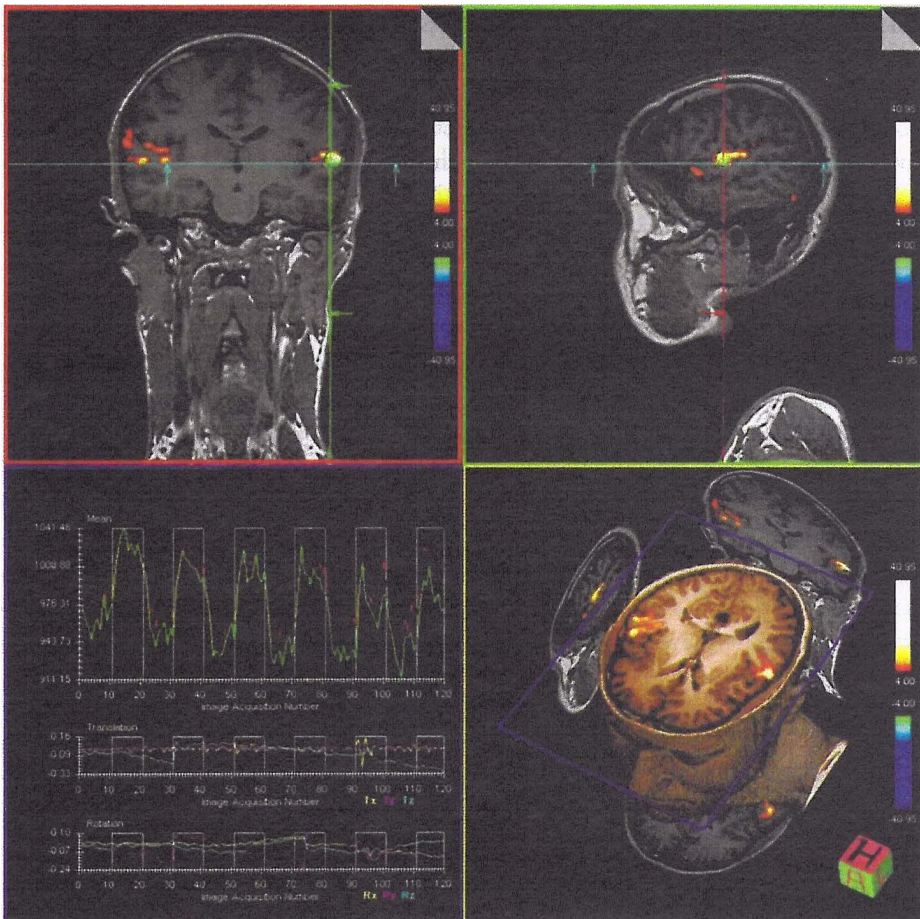
Metody oceny przetwarzania informacji słuchowej dzieli się ponadto ze względu na fragment drogi słuchowej, którego dotyczą. Działanie ucha środkowego i wewnętrznego można badać za pomocą metod akustycznych i elektroakustycznych. Jedną z metod pozwalających na badanie odcinka znajdującego się wyżej, tj. od nerwu ślimakowego do okolic wzgórza, jest technika ABR (ang. *Auditory Brainstem Response*) – [wspomniana powyżej] rejestracja słuchowych potencjałów wywołanych z pnia mózgu.

Technika fMRI jest metodą, która pozwala (w sposób pośredni) obserwować aktywność komórek nerwowych w obrębie mózgowia. Jest to technika nieinwazyjna, opierająca się na działaniu silnego pola magnetycznego. Poddanie się badaniu techniką fMRI nie ma żadnych skutków ubocznych (brak promieniowania jonizującego mogącego uszkodzić tkankę). Zasada jej działania jest stosunkowo prosta. Mózg, podobnie jak inne narządy w ludzkim ciele, wymaga ciągłego dostarczenia tlenu, aby dzięki procesom metabolicznym, przy udziale glukozy, wytwarzać niezbędną energię. Pracujące neurony pobierają tlen z otaczających je naczyń krwionośnych, na co układ krwionośny reaguje, po upływie około 4–6 sekund, zwiększeniem przepływu krwi w danym obszarze mózgu. Efekt ten nazywany jest odpowiedzią hemodynamiczną mózgu. Tlen dostarczany jest przez składnik krwi zwany hemoglobina. Już w 1935 roku stwierdzono, że magnetyczne właściwości hemoglobiny zależą od ilości transportowanego tlenu. Tę właśnie zależność wykorzystuje technika fMRI. Deoksyhemoglobina jest cząsteczką paramagnetyczną, podczas gdy oksyhemoglobina (hemoglobina + tlen) jest diamagnetykiem. Obecność deoksyhemoglobiny w naczyniach krwionośnych powoduje zmiany w jednorodności lokalnego pola magnetycznego między naczyniami a otaczającą tkanką. Te drobne zmiany pola magnetycznego można zarejestrować za pomocą rezonansu magnetycznego. Na obrazie mózgu objawia się to niewielkim wzrostem intensywności (jasności) obrazu. Należy podkreślić fakt, że metoda fMRI nie mierzy aktywności neuronów bezpośrednio, ale pośrednio poprzez zmianę utlenowania krwi wokół obszaru, w którym pracują neurony.

Warunki, w jakich odbywa się badanie, mogą być dla niektórych osób trudne. Osoba badana leży w skanerze w tunelu, a wokół głowy ma nałożoną cewkę (antennę) do odbioru sygnału radiowego. Sygnał ten powstaje w wyniku rezonansu protonów (jąder wodoru) w tkance mózgowej umieszczonej w silnym polu magnetycznym. Podczas badań z wykorzystaniem bodźców słuchowych, hałas towarzyszący pracy skanera, osiągający 94–102 dB, wchodzi w interakcję z bodźcami, maskując w pewnym zakresie efekt pobudzenia. Stosuje się zatem specjalne procedury badawcze, w których bodźce akustyczne podawane są w momentach, gdy skaner nie generuje hałasu. Bodźce podaje się za pomocą specjalnych słuchawek, które wykonane są w technologii pozwalającej na pracę w silnym polu magnetycznym oraz jednocześnie tłumią w pewnym zakresie hałas skanera. Podczas badania, które trwa około 30 minut, rejestrowanych jest kilka tysięcy obrazów, na których można zaobserwować zachodzące zmiany w utlenowaniu mózgu. Obrazy są następnie poddawane złożonej obróbce komputerowej, w wyniku której powstają mapy aktywności mózgu związane z przetwarzaniem przez mózg prezentowanych bodźców.

Na rysunku 3 uwidoczniono regiony mózgu, w których wystąpiła aktywność neuronalna związana ze słuchaniem prostych dźwięków. W lewym dolnym rogu przedstawiony jest wykres czasowy sygnału MR z obszaru kory słuchowej (zielony przebieg reprezentuje zmianę sygnału w ośrodku pierwotnej kory słuchowej lewej

półkuli mózgu, natomiast czerwony przebieg – analogicznie, w prawej półkuli mózgu). Rzeczywisty przebieg sygnału został przedstawiony na tle okresów, w których naprzemiennie była włączana i wyłączana stymulacja dźwiękami (ciągła biała linia). Jak widać, odpowiedź neuronalna była wzmożona podczas słuchania dźwięków. Najprostszą stymulacją akustyczną, jaką można zastosować w badaniu fMRI, jest ton, przykładowo 500 Hz. Jednak lepszy efekt uzyskuje się przy zastosowaniu dźwięków złożonych, na przykład pulsujących z częstotliwością 5 Hz lub złożonych z kilku tonów jednocześnie.



Rys. 3. Lokalizacja kory słuchowej w mózgu – na przykładzie jednej osoby [badania własne].

Obrazowanie funkcji drogi słuchowej możliwe jest na poziomie kory mózgu i niektórych jąder podkorowych. Ponieważ jednak za pomocą techniki fMRI otrzymujemy głównie mapę aktywności istoty szarej (skupiska komórek nerwowych),

na przekrojach mózgu nie widać połączeń (istoty białej), za pośrednictwem których informacja o usłyszonym dźwięku przekazywana jest między regionami mózgu. Do oceny istoty białej stosuje się inną technikę MR – obrazowanie tensora dyfuzji (ang. DTI) – która wykorzystuje fakt, iż obrazowane cząsteczki wody w mózgu preferencyjnie poruszają się wzdłuż (a nie np. w poprzek) włókien nerwowych.

Obecnie celem wielu zespołów badawczych na świecie jest stworzenie map aktywności mózgu człowieka ze szczególnym uwzględnieniem kory słuchowej oraz mechanizmów sprzężeń zwrotnych w układzie słuchowym, których zaburzenia mogą leżeć u podłoża wielu chorób obejmujących ten układ. Badania dotyczą między innymi oceny organizacji tonotopowej kory słuchowej, odbioru strukturalny przestrzennej i czasowej dźwięków, ich rozpoznawania i lokalizacji, wpływu czasu na przetwarzanie informacji na poziomie mózgowym oraz określenia obszarów selektywnie reagujących na dźwięki mowy. W przypadku każdego z wymienionych zastosowań, dla potrzeb badania metodą MR konieczne jest opracowanie odpowiednich bodźców i protokołów badawczych, które w najbardziej efektywny sposób uwidaczniają poszczególne obszary funkcjonalne kory mózgowej. Badania te przyczyniają się do lepszego zrozumienia mechanizmów zaburzeń niedosłuch, szumy uszne, głuchota psychogenna, zaburzenia uwagi słuchowej, zaburzenia mowy i języka, afazje, udar oraz ich konsekwencji.

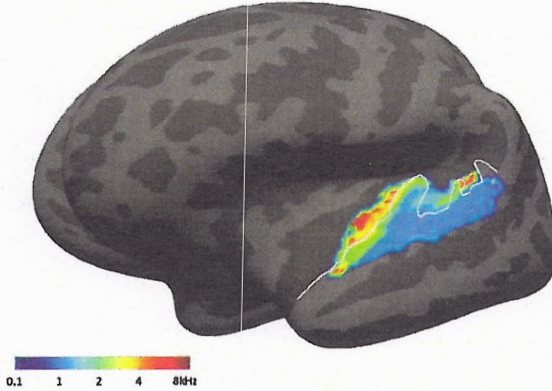
PRZYKŁADY Z BADAŃ WŁASNYCH

BADANIA ORGANIZACJI TONOTOPOWEJ PIERWOTNEJ KORY SŁUCHOWEJ

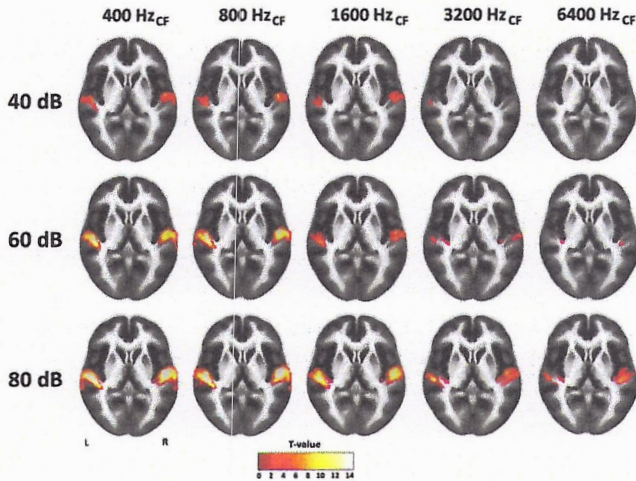
Badanie organizacji tonotopowej kory słuchowej wiąże się z wyznaczeniem obszarów, których aktywność związana jest z reakcją na różne częstotliwości słyszalnych dźwięków. Jak wspomniano wcześniej, ślimak w uchu wewnętrznym cechuje się tym, że poszczególne jego odcinki specjalizują się w kodowaniu różnych zakresów częstotliwości. Stosując jako bodźce dźwięki złożone o różnych częstotliwościach środkowych, można za pomocą techniki fMRI zarejestrować obszary kory słuchowej je przetwarzające. Przykład takiego dźwięku to prezentowane jednocześnie 5 tonów o częstotliwości od 664 Hz do 984 Hz, który reprezentuje ton środkowy o częstotliwości środkowej 800 Hz. Na tej podstawie można wyznaczyć indywidualną i grupową mapę organizacji tonotopowej w obszarze pierwotnej kory słuchowej. Jak uwidoczniło to na rysunku 4, wysokie i średnie częstotliwości dźwięku (kolory czerwony i żółty) reprezentowane są wzdłuż przedniej, wewnętrznej krawędzi zakrętu Heschla, a niskie – na jego zewnętrznej krawędzi.

Technika fMRI umożliwia także ocenę wpływu poziomu intensywności dźwięku (o wskazanych częstotliwościach środkowych) na wielkość aktywności w korze słuchowej. Jak widać na rysunku 5, wraz ze wzrostem intensywności obszary aktywne stają się coraz większe. Ponadto, wyniki badań wskazują, że niższe często-

tliwości dźwięku (np. 400 Hz) wywołują większe pobudzenie kory słuchowej. Oba te zjawiska są konsekwencją wzorca przechodzenia fali dźwiękowej przez ślimak w uchu wewnętrznym człowieka. Gdy prezentowane dźwięki są głośne oraz o niskiej częstotliwości, impulsy elektryczne do wyższych struktur układu słuchowego przekazywane są z całej długości ślimaka – od podstawy aż do szczytu. Innymi słowy, w takim przypadku wibruje cała struktura ślimaka.



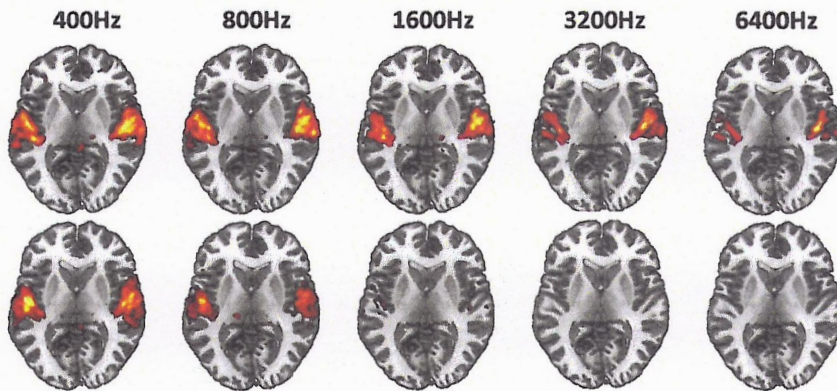
Rys. 4. Mapa tonotopowa kory słuchowej – badania fMRI w grupie 12 osób [badania własne]; biała linia oznacza anatomiczne krawędzie zakrętów kory mózgowej w płatach skroniowych [Wolak i in., 2017a].



Rys. 5. Przekroje mózgu ukazujące obszar pierwotnej kory słuchowej, otrzymane w badaniu fMRI w odpowiedzi na różne poziomy natężenia dźwięku [badania własne, N = 12] [Wolak i in., 2017a].

Badania naukowe potwierdzają przypuszczenia, że w przypadku wrodzonej głuchoty całkowitej następuje zmiana organizacji strukturalnej i funkcjonalnej mózgu. We wczesnym dzieciństwie następuje tak zwany okres synaptogenezy, czyli tworzenia się połączeń neuronalnych. Jej nasilenie obserwuje się we wczesnym okresie rozwoju (przed narodzeniem) podczas kształtowania się układu nerwowego, ale tworzenie się nowych synaps w układzie nerwowym zachodzi przez całe życie osobnika – proces ten leży u podstawy zjawiska zwanego neuroplastycznością. Podczas synaptogenezy neurony spontanicznie łączą się, tworząc bardzo gęstą sieć połączeń (nawet ok. 15 tysięcy połączeń z jednego neuronu u 1–2-letnich dzieci), podczas gdy osoba dorosła ma średnio około 5 tysięcy połączeń. Neurony, którym nie uda się utworzyć połączeń synaptycznych, uruchamiają proces apoptozy – programowanej śmierci komórki. Wyeliminowanych w ten sposób zostaje około połowa neuronów. Tuż po urodzeniu neurony mają niewiele wypustek i synaps. Zmniejszają one w pierwszych dwóch latach życia. Następnie, w wyniku procesów komórkowych, modyfikowana jest liczba synaps. Największe znaczenie dla wytworzenia połączenia na poziomie komórkowym i molekularnym mają długotrwałe wzmocnienia synaptyczne (LTP – *long term potentiation*) – to one decydują, które połączenia zostaną utrwalone. W wyniku braku stymulacji słuchowej (głuchota) nie wytwarzają się połączenia, które są kluczowe dla przetwarzania i przekazywania informacji słuchowej. Ponadto proces apoptozy nie zachodzi w sposób optymalny. W przypadku nabytych uszkodzeń słuchu efekty są bardzo indywidualne i zależą od doświadczenia słuchowego danej osoby. Dodatkowo stwierdzono, że w celu kompensacji deprivacji słuchowej w mózgu powstają lub wzmacniają się dodatkowe połączenia neuronalne między korą słuchową oraz korą odpowiadającą za analizę informacji pochodzących z innych zmysłów, to jest wzroku czy dotyku, jak również wyższych struktur mózgowych. Dzięki wzmożonej współpracy między zmysłami osoba z niedosłuchem może sobie lepiej radzić w codziennym życiu.

Okazuje się, że również w przypadku tak zwanej częściowej głuchoty, to jest ciężkiego niedosłuchu odbiorczego jedynie w zakresie wysokich częstotliwości dźwięku, obraz czynności mózgu jest zmieniony. W zależności od stopnia uszkodzenia oraz tego, czy uszkodzone są również komórki rzęsaty wewnętrzne, nakładają się na siebie w różnej mierze dwa efekty. Z jednej strony obniżona selektywność częstotliwościowa na poziomie ślimaka spowodowana uszkodzeniem komórek słuchowych zewnętrznych powoduje, iż aktywność w korze słuchowej odpowiada szerszym zakresom częstotliwości, a więc powiększa się w stosunku do szerokości pasma wywołującego tę aktywność dźwięku. Z drugiej jednak, gdy dodatkowo uszkodzone są komórki słuchowe wewnętrzne (niedosłuch na poziomie powyżej 50–60 dB), pobudzenie nie jest w pełni kodowane oraz przekazywane do wyższych struktur drogi słuchowej. W efekcie zakres aktywności rejestrowanej w korze słuchowej staje się bardziej ograniczony (rys. 6).

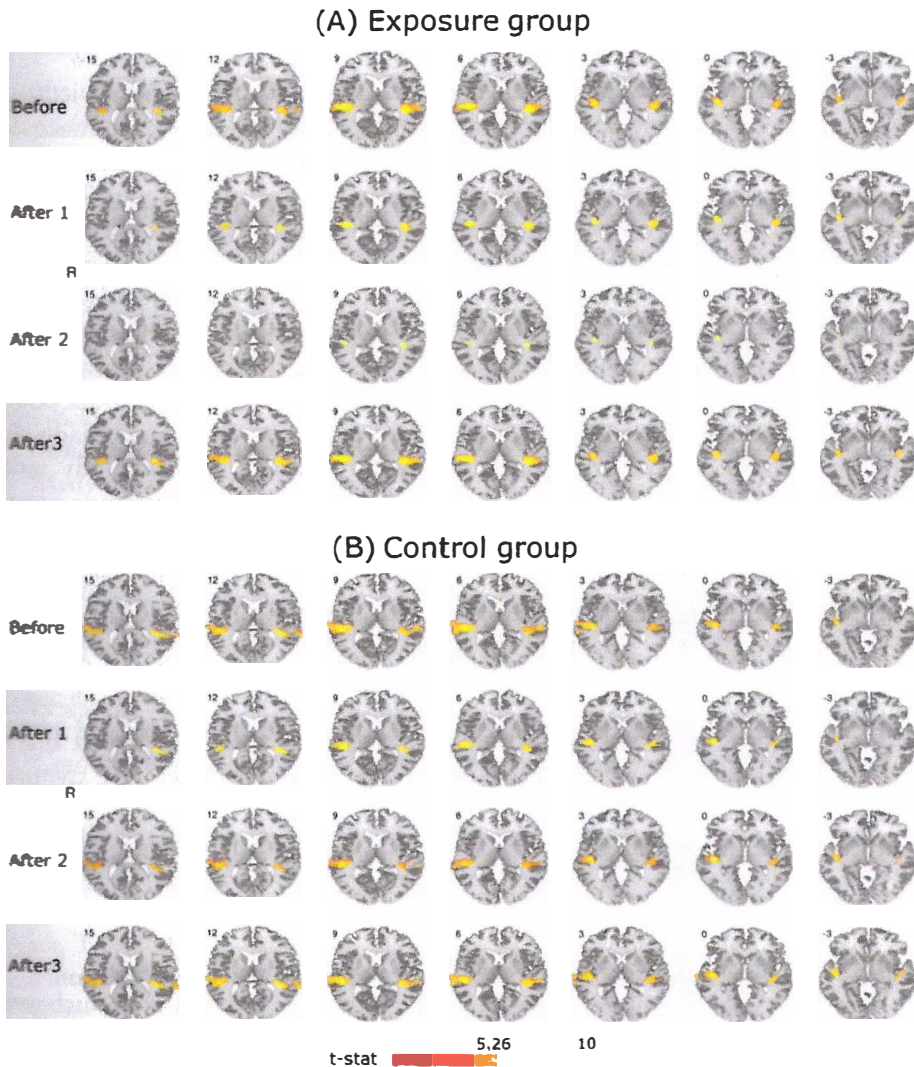


Rys. 6. Aktywność kory słuchowej u osób ze słuchem prawidłowym (górny rząd) oraz z częściową głuchotą (dolny rząd) w odpowiedzi na zakresy częstotliwości od 400 Hz do 6400 Hz [badania własne]. Obszary aktywności mózgu w odpowiedzi na niższe zakresy częstotliwości są większe niż w normie (słuch prawidłowy lub nieznaczne uszkodzenie); pobudzenie kory słuchowej przez wyższe dźwięki jest znacznie mniejsze lub nie występuje (znaczne uszkodzenie wszystkich komórek słuchowych) [Wolak i in., 2017b].

BADANIA OBCIĄŻENIA SŁUCHOWEGO

W prowadzonych w Naukowym Centrum Obrazowania Biomedycznego (IFPS, Kajetany) badaniach fMRI zmierzaliśmy lokalizację i wielkość pobudzenia kory słuchowej w odpowiedzi na proste dźwięki przed i po 15-minutowej ekspozycji na szum szerokopasmowy na poziomie 85 dB. Po obciążeniu hałasem odpowiedzi mierzone w trzech kolejnych sesjach fMRI (każde z nich trwało 10 min a więc pierwsze od 0–10 min, drugie 10–20 min, trzecie 20–30 min) (rys. 7). Wyniki wskazują, iż narażenie na hałas powoduje tymczasowe obniżenie aktywności w korze słuchowej. Aktywność wraca do poziomu wyjściowego około 20 minut po obciążeniu słuchowym. Podobny efekt, choć krócej trwający, obserwuje się w badaniu audiometrii tonalnej w postaci podwyższenia progu słyszenia. W życiu codziennym zjawiska te odpowiadają wrażeniu „ogłuszenia” po wyjściu z bardzo głośnego miejsca, na przykład z dyskoteki.

Niejako odwrotny efekt obserwuje się, gdy człowiek przebywa w kabinie cizy. W sytuacji braku stymulacji słuch wyostrza się (próg słyszenia się obniża) i zaczynamy słyszeć dźwięki fizjologiczne własnego ciała, których na co dzień nie zauważamy.



Rys. 7. Zmiany wielkości pobudzenia w korze słuchowej w wyniku ekspozycji na hałas. Uwidoczniono aktywność kory słuchowej w odpowiedzi na tony przed obciążeniem hałasem [*before*] oraz 0–10 min [*after 1*], 10–20 min [*after 2*], 20–30 min [*after 3*] po nim (*exposure group*); grupa kontrolna (*control group*) nie została poddana obciążeniu słuchowemu – pomiędzy sesjami „*before*” oraz „*after 1*”, przebywała w relatywnej ciszy w skanerze MR. W rzędach przedstawiono różne przekroje mózgu zebrane w podanych okresach [Włolak i in., 2016].

PODSUMOWANIE

W nawiązaniu do tytułowego pytania „Czy neurony lubią ciszę?”, odpowiedź jest dość złożona. Z jednej strony nadmierna stymulacja głośnymi dźwiękami może doprowadzić do nieodwracalnej degeneracji receptorów słuchowych, związanej z tym degeneracji neuronów, a w konsekwencji niedosłuchu, a nawet głuchoty. Z drugiej strony brak stymulacji powoduje brak możliwości uczenia się neuronów i również prowadzi do deprywacji sensorycznej. Bez stymulacji neurony znajdujące się w różnych regionach kory mózgowej, w tym w obszarach słuchowych, nie są w stanie wyspecjalizować. Nadal dość tajemniczym zjawiskiem będącym konsekwencją zaburzonej równowagi pobudzenia i hamowania w układzie słuchowym są tzw. szumy uszne (subiektywne słyszenie dźwięków przy braku zewnętrznego źródła pobudzenia). Należy jednak podkreślić, że dla zdrowego funkcjonowania układu słuchowego krótkie okresy ciszy są jak najbardziej wskazane. W czasie gdy mózg może się odciąć od bodźców zewnętrznych, choćby na chwilę, następuje utrwalanie i integracja informacji uzyskanych w ciągu dnia. Jest to czas na uporządkowanie zdobytej wiedzy i refleksję. Zebrane bodźce stają się inspiracją dla tzw. twórczego myślenia. Osoby, które są poddane bezustannej stymulacji – jak na przykład młodzi ludzie, którzy nie zdejmują słuchawek z uszu – nie dają sobie tego czasu; najczęściej „nastawieni” są jedynie na odbiór bodźców, a ich zdolność do tworzenia i wyrażania własnych myśli może być ograniczona. Wniosek zatem jest następujący: żadna ze skrajności nie jest odpowiednia dla utrzymania aktywności i sprawności neuronów w korze mózgowej. Neurony „lubią” być stymulowane, ale w umiarkowanej formie.

ŹRÓDŁA ILUSTRACJI

IFPS (2014). *Jak słyszy mózg? Tonotopowa organizacja kory słuchowej*, <http://slysze.ifps.org.pl/jak-slyszy-mozg-tonotopowa-organizacja-kory-sluchowej/> (dostęp: 2017).

Wikipedia (2017). *Granice słyszalności*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Granice_slyszalności (dostęp: 2017).

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

Cieśla, K. (2016). *Badania fMRI organizacji tonotopowej pierwotnej kory słuchowej u osób z częściową głuchotą*, praca doktorska, Warszawski Uniwersytet Medyczny.

Cieśla K., Wolak T., Lorens A., Heimler B., Skarżyński H., Amedi A., (2019). *Immediate improvement of speech-in-noise perception through multisensory stimulation via an auditory to tactile sensory substitution*, *Restorative Neurology and Neuroscience*, 37(2), s. 155–166.

- ettel, S. A., Song, A. W., McCarthy, G. (2014). *Functional magnetic resonance imaging*, 3rd ed., Sinauer Associates, Oxford University Press.
- gers, D. R. (2014). *Assessment of Tonotopically Organised Subdivisions in Human Auditory Cortex Using Volumetric and Surface-Based Cortical Alignments*, *Human Brain Mapping* 35 (4), s. 1544–1561.
- ger, D. R., van Dijk, P., Schoenmaker, E. S., Backes, W. H. (2007). *fMRI activation in relation to sound intensity and loudness*, *NeuroImage* 35 (2), s. 709–718.
- re, B. C. J. (1999). *Psychologia słyszenia*, A. Sęk, E. Skrodzka (tłum.), Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań.
- rzyński, H. (2014). *Long-term results of partial deafness treatment*, *Cochlear Implants International* 15 (Sup 1), s. 21–23.
- rzyński, P. H. (2012). *Badanie zjawiska zmęczenia słuchowego metodą fMRI [Assessment of auditory fatigue using fMRI]*, praca doktorska, Warszawski Uniwersytet Medyczny.
- rzyński, P. H., Wolak, T., Skarżyński, H., Lorens, A., Śliwa, L., Rusiniak, M., Pluta, A., Lewandowska, M., Cieśla, K., Jędrzejczak, W. W., Olszewski, Ł. (2013). *Application of the functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) for the Assessment of the Primary Auditory Cortex Function in Partial Deafness Patients. A preliminary study*, *The Journal of International Advanced Otology* 9 (2), s. 153–160.
- ak, T., Cieśla, K., Rusiniak, M., Piłka, A., Lewandowska, M., Pluta, A., Skarżyński, H., Skarżyński, P. H. (2016). *Influence of Acoustic Overstimulation on the Central Auditory System: An Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) Study*, *Medical Science Monitor* 22, s. 4623–4635.
- ak, T., Cieśla, K., Wójcik, J., Skarżyński, H. (2017a). *Effect of sound intensity on level of activation in auditory cortex as measured by fMRI*, *Journal of Hearing Science* 7(4), s. 20–27.
- ak, T., Cieśla, K., Lorens, A., Kochanek, K., Lewandowska, M., Rusiniak, M., Pluta, A., Wójcik, J., Skarżyński, H. (2017b). *Tonotopic organization of the auditory cortex in sloping sensorineural hearing loss*, *Hearing Research* 355, s. 81–96.
- ds, D. L., Stecker, G. C., Rinne, T., Herron, T. J., Cate, A. D., Yund, E. W., Liao L., Kang, X., (2009). *Functional maps of human auditory cortex: effects of acoustic features and attention*, *PLoS One* 4 (4), s. e5183.

Tomasz Wolak – kierownik Naukowego Centrum Obrazowania Biomedycznego (COB) oraz adiunkt w Światowym Centrum Słuchu w Kajetanach. NCOB jest nowoczesnym laboratorium naukowo-klinicznym wyposażonym w skaner rezonansu magnetycznego 3T Siemens Prisma Fit. Dr inż. Wolak ukończył studia magisterskie oraz doktoranckie z zakresu elektroniki jądrowej i medycznej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Habilitację uzyskał na Wydziale Nauk o Zdrowiu Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Jest aktywnie zaangażowany w realizację wielu projektów badaw-

zych, które wykorzystują technikę czynnościowego rezonansu magnetycznego do badania przetwarzania informacji zmysłowych oraz wyższych procesów poznawczych. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się wokół tematów związanych z technikami rezonansu magnetycznego, analizą, segmentacją i wizualizacją obrazów, cyfrowymi atlasami mózgu, obrazowaniem procesów językowych oraz słuchowych. Ma 20-letnie doświadczenie badawcze z zakresu wykorzystania techniki fMRI; wykonał ponad 3000 badań oraz analiz fMRI.

- head of the Bioimaging Research Center and Assistant Professor at the World Hearing Center of Institute of Physiology and Pathology of Hearing in Kajetany, Poland. He has a master's degree and a doctorate at Medical and Nuclear Electronics Division of the Warsaw University of Technology. He obtained his habilitation at the Faculty of Health Sciences of the Medical University of Warsaw. He actively participated in numerous research projects on application of the fMRI technique for studying sensory and cognitive processes in humans. He was involved in the formation of the Laboratory of Diagnostic Imaging of the Institute of Physiology and Pathology of Hearing. In March 2009, the Laboratory became the Bioimaging Research Center, equipped with a modern 3T magnetic resonance scanner. His main interests are functional magnetic resonance imaging, brain image segmentation, image analysis and visualization, language and auditory functional studies. He collaborated with many clinical and scientific centers in Poland, where he introduced the technique of fMRI into clinical and research practice. He has 20 years of experience in the subject of neuroimaging, more than 3000 performed studies and analyses, and participated in several research projects related to fMRI and EEG/fMRI.

Katarzyna Cieśla – absolwentka 5-letnich studiów magisterskich na Wydziale Psychologii Uniwersytetu Warszawskiego oraz – równolegle – na Wydziale Lingwistyki Stosowanej (filologia angielska i germańska) tejże uczelni. Ukończyła roczny program magisterski Cognitive Brain Imaging na Wydziale Medycyny i Nauk Humanistycznych (Faculty of Medical and Human Sciences) Uniwersytetu w Manchesterze (Wielka Brytania). Pracę doktorską na temat obrazowania kory słuchowej u pacjentów z niedosłuchem za pomocą czynnościowego rezonansu magnetycznego (fMRI) obroniła na Uniwersytecie Medycznym w Warszawie. Obecnie przebywa na 2-letnim stażu naukowym w katedrze Prof. Amira Amediego na Uniwersytecie Hebrajskim w Izraelu. Jej zainteresowania dotyczą funkcjonowania neuropsychologicznego pacjentów z niedosłuchem i/lub szumami usznymi oraz zmian czynnościowych i strukturalnych w mózgu, wynikających z okresu deprywacji słuchowej oraz rehabilitacji po wszczepie implantu ślimakowego. Dr Cieśla zaangażowana jest w realizację kilku grantów naukowych finansowanych przez NCN, MNiSW oraz ERC.

graduated from a 5-year master's degree programme at the Faculty of Psychology and in parallel at the Faculty of Applied Linguistics (English and German philology), at the University of Warsaw. Then she completed a 1-year master's degree programme, Cognitive Brain Imaging, at the Faculty of Medical and Human Sciences of the University of Manchester in Great Britain. She defended

her doctoral dissertation on auditory cortex imaging in patients with hearing loss, with the use of functional magnetic resonance (fMRI), at the Medical University of Warsaw. Currently she is on a 2-year internship programme in the lab of Prof Amir Amedi at the Hebrew University in Israel. Dr. Cieśla is interested in neuropsychological functioning of patients with hearing impairments and/or tinnitus, as well functional and structural changes in the brain due to auditory deprivation, as well as following rehabilitation with a cochlear implant. Dr. Cieśla participates in several research grants funded by the Polish National Science Centre, Polish Ministry of Science and Higher Education, European Research Council.

Artur Lorens – Dr hab. n. o zdr. inż., prof. IFPS, kierownik Zakładu Implantów i Percepcji Słuchowej w Światowym Centrum Słuchu, Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu. Doświadczenia naukowe w zakresie stosowania systemów implantów ślimakowych, psychoakustyki, modelowania percepcji słuchowej zdobywał zarówno w kraju jak i za granicą podczas licznych pobytów szkoleniowych między innymi w Niemczech, Austrii, Holandii, Stanach Zjednoczonych. Był głównym wykonawcą w czterech projektach badawczych KBN. W latach 2006–2010 był kierownikiem Grantu Europejskiego HearingTreat Marie Curie, a obecnie jest kierownikiem grantu Narodowego Centrum Nauki. Wyniki prac badawczych prezentował na licznych konferencjach krajowych i zagranicznych. Otrzymał dwie nagrody zespołowe pierwszego stopnia Ministra Zdrowia za opracowanie programu rehabilitacji słuchu po wszczepieniu implantu ślimakowego oraz za opracowanie i wdrożenie programu implantów słuchowych wszczepianych do pnia mózgu.

Ph.D., Eng. Prof. IFPS, head of the Department of Auditory Implant and Perception of World Hearing Center of the Institute of Physiology and Pathology of Hearing, Warsaw, Poland. Scientific experience in the field of auditory implants, psychoacoustics and auditory perception modeling. Member of the Polish Scientific Association of the Hearing and Communication Disorders. Member of the American Auditory Society, International Society of Audiology, European Society for Artificial Organs, European Academy of Otology&Neurootology. Scientist in charge of the HearingTreat Marie Curie EU project (2006–2010). Main executor of five projects of the Polish State Committee for Scientific Research. He achieved First Award granted by the Minister of Health and Social Welfare for outstanding achievements in health care, including elaboration and implementation of the brainstem implants program (2000) and First Degree Award for elaboration of the first Polish version of rehabilitation program for the hearing impaired, provided with the cochlear implants (1997), granted by the Minister of Health and Social Welfare in Poland.

Agata Szkiełkowska – zyciorys na s. 21.

Henryk Skarżyński – zyciorys na s. 21/22.