

Neurologiczne uwarunkowania rozwoju funkcji słuchowych i neuroplastyczności w procesie uczenia się¹

MAGDALENA OLEMPKA-WYSOCKA*

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Instytut Badań Edukacyjnych

Mózg dziecka ma wyjątkową zdolność ciągłego rozwoju, reagowania na zmieniające się warunki i przystosowywania się do nich. Współczesne badania wskazują na intensywny rozwój połączeń synaptycznych w najmłodszych latach życia dziecka. Dodatkowo może być on uwarunkowany czynnikami genetycznymi oraz środowiskowymi. Dzięki neuroplastyczności potencjalne możliwości rozwoju dziecięcego mózgu są ogromne. Istotne jest także to, że neuroplastyczność umożliwia rozwijanie się układu nerwowego poprzez oddziaływanie zmiennych związanych ze środowiskiem, zapamiętywaniem i uczeniem się nowych umiejętności. W tym procesie równie istotną rolę odgrywają funkcje słuchowe, czyli uwaga, percepcja dźwięków mowy, pamięć słuchowa. Uczestniczą one w opanowaniu wielu umiejętności szkolnych, a także biorą udział w nauce procesu czytania i pisanie. Jak wskazują badania, stanowią także istotny element związany z przyswajaniem nowych treści przedmiotowych, zwłaszcza tych, które wymagają pamięciowego opanowania materiału.

SŁOWA KLUCZOWE: plastyczność, neuroplastyczność, funkcje słuchowe, rozwój funkcji słuchowych

¹ Artykuł powstał w ramach projektu „Wspieranie dostępności edukacji dla dzieci i młodzieży”, dofinansowanego ze środków europejskich z Programu „Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021–2027” (nr projektu: FERS.01.06-IP.05-0002/23).

* E-mail: magda.olempka@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9740-3302>

Neurological determinants of auditory function development and neuroplasticity in learning

A child's brain has the unique ability to continuously develop, respond to, and adapt to changing conditions. Modern research indicates the intensive development of synaptic connections in the youngest years of a child's life. In addition, they can be influenced by genetic and environmental factors. The potential development of a child's brain is enormous, thanks to neuroplasticity. Also important is the fact that it allows the nervous system to develop through the influence of variables relating to the environment, memorization, and learning new skills. Auditory functions play an equally important role in this process, i.e., attention, perception of speech sounds, and auditory memory. They participate in the mastery of many school skills and also in the process of learning reading and writing. As research indicates, they are also an important component associated with the acquisition of new subject content, especially those that require the memorization of material.

KEYWORDS: plasticity, neuroplasticity, auditory functions, development of auditory functions

1. Wprowadzenie

W procesie percepcji dźwięków ważnym elementem jest rozwój funkcji słuchowych. Niewątpliwie słuch powstaje w mózgu. Musimy sobie zdawać sprawę z tego, że mózg jest najbardziej plastyczny i ma największy potencjał do tworzenia połączeń synaptycznych, gdy dziecko jest najmłodsze. Ze względu na to, że mózg niemowlęcia rozwija się szybko i intensywnie, musi mieć zapewnione odpowiednie warunki, a przede wszystkim adekwatną stymulację słuchową. Z drugiej strony należy pamiętać, że w przypadku braku dźwięku mózg reorganizuje się. Gdy jest stymulowany bodźcami słuchowymi, rozwijają się synapsy łączące neurony w celu przetwarzania tych sygnałów. Jeśli część mózgu nie jest

stymulowana, nieużywane synapsy są eliminowane ze ścieżek neuronalnych (przycinanie synaptyczne), dzięki czemu neurony mogą zostać wykorzystane w inny sposób. Przycinanie synaptyczne zachodzi przez całe życie, jednak w najbardziej znaczący sposób w ciągu pierwszych kilku lat życia. Jeśli wcześniej nie zapewnimy wyraźnej stymulacji słuchowej, nastąpią znaczne zmiany w ośrodkach słuchowych, a dziecko nie będzie miało kolejnej okazji do rozwoju tych połączeń neuronalnych².

2. Proces przetwarzania dźwięków w mózgu – od odbioru bodźca dźwiękowego do jego interpretacji

Słyszenie jest procesem, w którym fale energii elektrycznej lub dźwiękowej są zamieniane na impulsy nerwowe. Ucho jako narząd przedsionkowo-ślimakowy składa się z trzech podstawowych części: ucha zewnętrznego, środkowego i wewnętrznego. Ucho zewnętrzne zbudowane jest z małżowiny usznej, przewodu słuchowego zewnętrznego oraz błony bębenkowej. Zadaniem małżowiny jest zbieranie dźwięków z otoczenia, zaś przewód słuchowy zewnętrzny wzmacnia je i kieruje w stronę błony bębenkowej, którą fale dźwiękowe pobudzają do drgań. Następnie dźwięk przekazywany jest do jamy bębenkowej, w której znajdują się kościczki słuchowe (młoteczek, kowadełko i strzemiączko). W uchu środkowym energia akustyczna jest zamieniana na energię mechaniczną, gdy błona bębenkowa zaczyna drgać. Energia mechaniczna jest następnie przesyłana przez łańcuch kościczek słuchowych. Ruchy kościczek³ przekazują dźwięk dalej – do ucha wewnętrznego. Ucho wewnętrzne znajdu-

² Wskazują na to badania m.in. Sharma, Martin i Roland, 2005.

³ Ruchy kościczek słuchowych mogą być odruchowo zmniejszane poprzez działanie dwóch mięśni znajdujących się w uchu środkowym. Pierwszy z nich – mięsień napienacz błony bębenkowej (unerwiony przez nerw trójdzielny) – przyczepiony jest do młoteczka. Poprzez pociąganie młoteczka do wewnątrz tłumi niskie tony, a także zwiększa napięcie błony bębenkowej. Drugi z mięśni – mięsień strzemiączkowy (unerwiony przez nerw twarzowy) – przyczepiony jest do strzemiączka. Poprzez wysunięcie podstawy strzemiączka z otworu prowadzącego do ucha wewnętrznego zmniejsza natężenie dźwięku (Young i Young, 2020)

je się w kości skroniowej. Składa się z dwóch przestrzeni wypełnionych płynem – błędnika kostnego i błędnika błoniastego. Błędnik kostny składa się z przedsionka, ślimaka i trzech kanałów półkolistych. Jego przestrzenie wypełnia perylimfa (przychłonka). Błędnik błoniasty położony jest wewnątrz błędnika kostnego i jest wypełniony endolimfą (śródechłonką) (Young, Young i Tolbert, 2020).

Energia mechaniczna z ucha środkowego zostaje przekształcona w energię hydrauliczną poprzez tworzenie fal w płynach, które znajdują się w ślimaku. Gdy fale przechodzą przez ślimak, poruszają się komórki włoskowate znajdujące się w narządzie Cortiego, co powoduje zmianę energii hydraulicznej na mechaniczną (w rzęskach komórek włoskowatych), a także zmianę energii mechanicznej na elektrochemiczną (w synapsie komórki włoskowatej do neuronu słuchowego). Zmiany te zachodzą w określonych miejscach narządu Cortiego (biegnącego wzdłuż ślimaka), które są związane z częstotliwością dźwięku. Podstawa ślimaka jest bardziej wrażliwa na dźwięki o wysokiej częstotliwości, a szczyt ślimaka na dźwięki o niskiej częstotliwości, co świadczy o tonotopowej organizacji ślimaka⁴. Ślimak jest zatem narządem o bardzo precyzyjnych możliwościach związanych z rozpoznawaniem właściwości dźwięków (Rouse, 2020). Aby dźwięk pod postacią impulsu nerwowego dotarł do kory mózgowej, musi przejść przez co najmniej cztery neurony (w zwoju nerwu VIII, w dolnej części pnia mózgowia, w górnej części pnia mózgowia, a także we wzgórzu) (Young, Young i Tolbert, 2020).

Centralna droga słuchowa kończy się w pierwotnej korze słuchowej. Organizacja tonotopowa, która miała początek w ślimaku, jest utrzymywa-

⁴ Zakres częstotliwości fal dźwiękowych rozróżnianych przez człowieka jest dość szeroki – od ok. 20 Hz (w szczycie ślimaka) do ok. 20 kHz (przy podstawie ślimaka). Pasma mowy znajduje się w przedziale od 250 do 6000–8000 Hz. Samogłoski w języku polskim znajdują się w paśmie częstotliwości od 250 do 2000 Hz, spółgłoski – w paśmie częstotliwości 2000–8000 Hz. Prawidłowe warunki do uczenia się mowy warunkują odbiór pasma częstotliwości od 125 do 8000 Hz (por. Cieszyńska-Rożek, 2018).

na w całym centralnym układzie słuchowym i jest także zachowana w korze pierwotnej. Pola Brodmanna o numerach 41 i 42 są odpowiedzialne za lokalizację, spostrzeganie, rozróżnianie dźwięku. Uszkodzenie tych obszarów może doprowadzić do utraty świadomości dźwięku (Rouse, 2020). Ważnym obszarem w zakresie słyszenia są także jądra oliwkowe górne (zlokalizowane w pniu mózgu, w pobliżu połączenia mostu oraz rdzenia przedłużonego) będące pierwszym przekaźnikiem słuchowym po jądrze ślimakowym w drodze do kory słuchowej. Informacje słuchowe przetwarzane w pierwotnej korze słuchowej są następnie przekazywane do pola 22. Brodmanna – obszaru Wernickego, który odpowiada m.in. za procesy związane z rozpoznawaniem głosek, wyrazów i zdań, a także jest związany z czynnościami nadawania mowy.

3. Funkcje słuchowe – ich rozwój i znaczenie

Rozwój słuchu u płodu i niemowlęcia obejmuje strukturalne części układu słuchowego, które rozwijają się w pierwszych 20 tygodniach ciąży, a jego neurosensoryczna część rozwija się głównie po 20. tygodniu ciąży. Układ słuchowy staje się funkcjonalny około 25. tygodnia ciąży. Ślimak, a także kora słuchowa w płacie skroniowym stanowią najważniejsze elementy w rozwoju układu słuchowego. Najbardziej krytycznym okresem dla rozwoju neurosensorycznej części układu słuchowego jest czas od około 25. tygodnia ciąży do około 5–6. miesiąca życia dziecka. W tym czasie komórki włosowate ślimaka, aksony nerwu słuchowego i neurony kory słuchowej płata skroniowego są przystosowywane do odbierania dźwięków o określonych częstotliwościach i intensywności. Jest to okres, w którym układ słuchowy szczególnie wymaga zewnętrznej stymulacji obejmującej mowę, muzykę i znaczące dźwięki z otoczenia. Jak pokazują badania, zarówno dzieci urodzone przedwcześnie, jak i noworodki urodzone o czasie nie są w stanie rozpoznać lub rozróżnić

istotnych dźwięków przy poziomie hałasu w tle przekraczającym 60 dB (Graven i Browne, 2008). Rozwój słuchowy zapewnia dziecku możliwość rozwijania świadomości dźwięków w otoczeniu oraz umiejętność rozpoznawania ludzi i przedmiotów na podstawie wydawanych przez nich dźwięków, dokonywania osądów na temat tego, co jest słyszane i skąd pochodzą dźwięki, oraz wykorzystywania słuchu nie tylko do rozpoznawania mowy, ale także do jej rozumienia i tworzenia (Hull, 2021).

Warto także zauważyć, że układ słuchowy formuje się według określonych sekwencji. Anatomiczne i strukturalne części układu rozwijają się już bardzo wcześnie. Badania jednoznacznie potwierdzają, że strukturalne części ślimaka w uchu środkowym są dobrze ukształtowane do 15. tygodnia ciąży i są anatomicznie funkcjonalne do 20. tygodnia ciąży. Układ słuchowy staje się funkcjonalny około 25–29. tygodnia ciąży, gdy komórki zwojowe jądra spiralnego w ślimaku łączą wewnętrzne komórki włoskowate z pniem mózgu i płatem skroniowym kory mózgowej. Pierwsze reakcje na dźwięki pojawiają się już w 16. tygodniu życia płodowego (komórki zwojowe w ślimaku są połączone z jądrami w pniu mózgu, które stymulują odpowiedź fizjologiczną). W 25–26. tygodniu ciąży głośny dźwięk może spowodować np. przyspieszenie akcji serca dziecka. Od około 28. do 30. tygodnia ciąży połączenia neuronalne z płatem skroniowym kory mózgowej stają się funkcjonalne. Jest to też istotny moment ze względu na początek rozwoju organizacji tonatopowej w korze mózgowej, odpowiedzialnej za odbiór, rozpoznawanie, rozróżnianie i reagowanie na dźwięki (Graven i Browne, 2008; Cieszyńska-Rożek, 2018). Słyszenie stanowi zatem kompleksowy proces, który polega nie tylko na wykrywaniu dźwięku, ale także na analizie i interpretacji odbieranych dźwięków. Zaburzenia percepcji dźwięków mowy związane z uszkodzeniem części obwodowej lub ośrodkowej prowadzą do licznych trudności w zakresie recepcji, rozróżniania, różnicowania i identyfikacji dźwięków,

pamięci słuchowej, a także lokalizacji i lateralizacji słuchowej (Kurkowski i Kruczyńska, 2019). Rozwój mózgu związany jest także ściśle z rozwojem innych systemów sensorycznych – rozwojem motorycznym, poznawczym i społeczno-emocjonalnym. Należy podkreślić, że wszystkie te sfery rozwoju są ze sobą połączone i zintegrowane. Wszystkie egzogenne lub zewnętrzne bodźce sensoryczne mają komponent emocjonalny, a także sensoryczny. Wiele bodźców sensorycznych ma również komponenty społeczne lub motoryczne zintegrowane z rozpoznawaniem i reakcją sensoryczną. Gdy systemy sensoryczne dojrzewają w ostatnich 8–10 tygodniach życia płodowego, rozpoczyna się proces uczenia się płodu. Rozwój mózgu, zarówno jego struktury, jak i funkcji, jest kształtowany przez wpływ i interakcję czterech głównych czynników: genetycznych, związanych ze środowiskiem, doświadczeniem i stymulacją narządów zmysłów (Graven i Brownie, 2008). W przypadku każdego systemu sensorycznego początkowa stymulacja związana jest z czynnikami wewnętrznymi lub endogennymi, ale w krytycznym lub wrażliwym punkcie rozwoju potrzebna jest zewnętrzna stymulacja i doświadczenie. Zewnętrzna stymulacja systemów sensorycznych musi występować w odpowiedniej kolejności, intensywności i formie. Jeśli czas, intensywność lub forma stymulacji są nieadekwatne, spowoduje to zakłócenie oczekiwanego rozwoju.

4. Neuroplastyczność – zjawisko i mechanizmy

Szczególnie ważnym zjawiskiem w rozwoju dziecka, w tym także rozwoju jego funkcji słuchowych, jest zjawisko plastyczności mózgu. Umożliwia ono dostosowanie układu nerwowego do warunków i potrzeb organizacji poszczególnych funkcji. Plastyczność mózgu stanowi jedną z podstawowych właściwości ośrodkowego układu nerwowego. Dzięki niej tkanka mózgowa ma możliwość odbioru informacji dochodzących ze środowiska zewnętrznego i wewnętrznego. Plastyczność tkanki ner-

wowej jest szczególnie widoczna w procesach związanych z uczeniem się i zapamiętywaniem (Kułakowska, 2003). Dzięki tym mechanizmom układ nerwowy dostosowuje się do zmian środowiska zewnętrznego i wewnętrznego, a także do skutków uszkodzeń układu nerwowego (Panaszuk, 2020). Plastyczność mózgu ma uniwersalny charakter ze względu na to, że w każdym przypadku zmian patogennych zachodzą czynności samonaprawcze. Uniwersalność zmian kompensacyjnych zachodzących w mózgu powoduje współwystępowanie neuronalnych procesów dezintegracyjnych pogłębiających stopień neurodezorganizacji i procesów samonaprawczych, a także objęcie tymi zmianami wszystkich poziomów struktury i funkcji ośrodkowego układu nerwowego oraz poziomu behawioralnego, co prowadzi do kompleksowej i złożonej reorganizacji funkcjonowania neuronalnego i psychicznego (Herzyk, 2005).

Jak wskazują współczesne badania, istnieją trzy rodzaje plastyczności w rozwijającym się mózgu: niezależna od doświadczenia, oczekująca na doświadczenia i taka, która jest od niego zależna. Plastyczność niezależna od doświadczenia wynika z faktu, że genom generuje przybliżoną łączność, która jest modyfikowana zarówno przez zdarzenia wewnętrzne, jak i zewnętrzne. Neurony, które są aktywne w tym samym momencie, zwiększają swoje połączenia, podczas gdy te, które nie są przypadkowo aktywne, osłabiają swoje połączenia. Plastyczność związana z oczekiwaniem na doświadczenie występuje głównie podczas wczesnego rozwoju postnatalnego. Trzeci rodzaj plastyczności, czyli ta zależna od doświadczenia, stanowi proces, w którym połączenia neuronów są modyfikowane przez doświadczenie. Proces ten rozpoczyna się we wczesnym okresie życia postnatalnego i trwa przez całe życie (Kolb, Harker i Gibb, 2017).

Reorganizacja funkcjonalna i strukturalna synaptycznych połączeń sieci neuronowych może być spowodowana czynnikami genetycznymi, ale także tymi związanymi ze środowiskiem, w którym rozwija się

i wychowuje dziecko. Ze względu na mechanizm aktywizujący procesy związane z plastycznością mózgu można wyróżnić sześć typów tej plastyczności.

Pierwszy z nich to plastyczność rozwojowa, czyli zdolność mózgu do tworzenia wielu nowych połączeń nerwowych w trakcie przyswajania różnych umiejętności, dzięki czemu organizm dostosowuje się do środowiska, wchodząc z nim w bezpośrednie interakcje. Na dynamiczne procesy związane z neuroplastycznością w wieku rozwojowym wpływa ekspresja określonych genów, a także odpowiedni poziom pobudzania neuronów przez bodźce z otoczenia. Jak wskazują badania, najistotniejszą cechą neuroplastyczności rozwojowej jest samo zjawisko nadprodukcji i obumierania komórek nerwowych oraz zanikanie niewykorzystywanych funkcjonalnie połączeń synaptycznych.

Drugi rodzaj plastyczności – kompensacyjna (pouszkodzeniowa) – stanowi o zdolności uszkodzonego mózgu dziecka lub też osoby dorosłej do tworzenia nowych połączeń nerwowych, co sprawia, że funkcje uszkodzonej tkanki nerwowej są przejmowane przez inną, nieuszkodzoną strukturę, co w konsekwencji prowadzi do odzyskania określonych sprawności. W przypadku uszkodzeń w zakresie układu nerwowego w mózgu zachodzą dwa antagonistyczne procesy dezintegracji połączeń (na skutek zmian zwyrodnieniowych) oraz kompensacji (na skutek neuroplastyczności).

Trzeci rodzaj plastyczności jest związany ze wzmożonym doświadczeniem, czyli zdolnością zdrowego lub uszkodzonego mózgu do zmian i przekształceń dzięki licznym doświadczeniom, co sprawia, że określone szlaki neuronalne są wzmacniane poprzez ciągłe powtórzenia.

Kolejny, czwarty rodzaj plastyczności jest związany z uczeniem się i pamięcią. Wskazuje on na zdolność zdrowego lub uszkodzonego mózgu do

tworzenia nowych ścieżek neuronalnych dzięki częstemu powtarzaniu czynności i utrwalaniu ich w pamięci. Należy także pamiętać, że reakcje na zmiany zachodzące w organizmie kształtują się wraz z nabywaniem doświadczenia, a także są związane ze zdolnością uczenia się i zapamiętywania.

Piąty wyodrębniony rodzaj plastyczności związany jest z występowaniem tego zjawiska przy uzależnieniach i wskazuje na powstawanie nowych dróg neuronalnych i utrwalanie pewnego zachowania, gdy w układzie dopaminergicznym dojdzie do pobudzenia. Substancje powodujące uzależnienia są neuroprzekaznikami, a ich pojawienie się w organizmie wzmacnia połączenia synaptyczne.

Ostatni, szósty rodzaj plastyczności to plastyczność patologiczna, która występuje np. przy epileptogenezie czy też bólu neuropatycznym (Panaszuk, 2016). Jak wskazuje Matthew Rouse (2020), plastyczność mózgu odnosi się do jego zdolności adaptacyjnych. Mózg pozostaje ciągle w procesie zmian ze względu na docierające do niego bodźce zewnętrzne i wewnętrzne. Autor wskazał zasady neuroplastyczności, które opisują jej istotę. Neuroplastyczność przedstawił jako właściwość, która może być „wykorzystana lub nie”, co może prowadzić do jej straty lub udoskonalenia. Istotne jest także powtarzanie (np. odpowiedniej liczby danych czynności, treści), intensywność stymulacji, czas związany z etapem rozwoju dziecka, znaczenie danego materiału, wiek osoby, przeniesienia z jednego zachowania na inne, a także mogące się pojawić zakłócenia innych zachowań. Szczegółowy opis poszczególnych zasad i reguł zawiera tabela 1.

Tabela 1.
Zasady i reguły neuroplastyczności

Zasada/reguła	Opis zasady
„Wykorzystaj albo strać”	Niewykorzystanie niektórych możliwych funkcji mózgu może doprowadzić do strat.
„Wykorzystaj i udoskonalaj”	Ćwiczenie niektórych funkcji mózgu może doprowadzić do poprawy jego funkcjonowania.
Specyficzność	Charakter doświadczenia determinuje charakter plastyczności. Specyficzne funkcjonalne zadania mogą zmieniać mózg bardziej niż niespecyficzne ogólne zadania.
Powtarzanie	Aby zaistniała plastyczność, konieczna jest odpowiednia liczba powtórzeń czynności lub treści.
Intensywność	Aby wywołać plastyczność, konieczna jest odpowiednia intensywność stymulacji.
Czas	W różnych momentach pojawiają się różne formy plastyczności związane przede wszystkim z rozwojem i możliwościami kompensacyjnymi.
Znaczenie	Doświadczenie musi mieć duże znaczenie dla wywołania plastyczności, co oznacza, że doświadczenie musi być ważne dla osoby, aby wywołać plastyczność jej mózgu. Nagradzające, funkcjonalne, motywujące zadanie terapeutyczne ma większe szanse wywołać plastyczność mózgu niż zadanie niewynagradzające, nefunkcjonalne i nudne.
Wiek	Plastyczność wywołana treningiem występuje łatwiej u osób młodszych niż starszych.
Przenoszenie	Plastyczność w odpowiedzi na jedno doświadczenie treningowe może zwiększyć zdolność do podobnych zachowań.
Zakłócenia	Plastyczność może zakłócać uczenie się innych zachowań.

Źródło: Rouse, 2020.

5. Neuroplastyczność i jej rola w przetwarzaniu słuchowym

Rozwój i dojrzewanie układu słuchowego, zarówno na poziomie obwodowym, jak i centralnym, ma zasadnicze znaczenie dla nabywania mowy, języka i umiejętności słuchowych. System obwodowy koduje trzy podstawowe parametry związane z bodźcami słuchowymi: czas, częstotliwość i intensywność. Te informacje akustyczne są następnie przetwarzane przez centralne struktury słuchowe, aby dotrzeć do kory mózgowej i być przez nią odbierane. Obserwacje płodów i noworodków wskazują na to, że obwodowy układ słuchowy jest strukturalnie i funkcjonalnie podobny do dorosłego praktycznie zaraz po urodzeniu. Natomiast centralny układ słuchowy wykazuje postępujące zmiany anatomiczne i fizjologiczne aż do wczesnej dorosłości. Istotne jest tutaj środowisko, w którym rozwija się dziecko, i doświadczanie możliwości słyszenia dźwięków, co stanowi czynnik krytyczny dla rozwoju słuchu. Z drugiej strony brak wczesnej i odpowiedniej stymulacji akustycznej opóźnia dojrzewanie neuronów, wpływając w szczególności na centralny słuchowy układ nerwowy i prowadząc do jego nietypowego rozwoju (Jutras, Lagacé i Koravand, 2020). Percepcja dźwięków otaczającego świata jest bardziej podstawową umiejętnością niż percepcja dźwięków mowy. Już w okresie prenatalnym zaczyna kształtować się podstawowa funkcja słuchowa związana z recepcją dźwięków. Okres niemowlęcy związany jest przede wszystkim z rozwojem umiejętności rozróżniania natężenia, wysokości, przebiegów melodycznych wypowiedzi oraz słuchowego różnicowania dźwięków mowy (Kurkowski i Kruczyńska, 2019).

Dziesięciolecia badań nad plastycznością neuronalną, czyli zdolnością mózgu do zmian w odpowiedzi na doświadczenia, stanowią także wyzwanie dla praktyków pracujących z dziećmi z uszkodzonym słuchem. Badania jednoznacznie wskazują, że istnieje pilna potrzeba zapewnienia tym dzieciom dostępu do dźwięków mowy. Gdy mózg nie jest odpo-

wiednio stymulowany we wczesnym okresie życia, reorganizuje się i dochodzi do zjawiska znanego jako plastyczność międzymodalna. W przypadku braku stymulacji słuchowej kora słuchowa zaczyna przejmować inne funkcje zwykle wykonywane przez obszary mózgu odpowiedzialne za przetwarzanie wzrokowe i dotykowe. Także wyniki przełomowego badania Longitudinal Outcomes of Children with Hearing Impairment (LOCHI) wykazały, że lepsze wyniki w zakresie języka receptywnego i ekspresyjnego wynikały z wcześniejszego dostępu do technologii (dopasowanie aparatu słuchowego lub wszczepienie implantu ślimakowego) (Madell i Hewitt, 2023; Ching i in., 2018).

Przez całe życie mózg jest zdolny do zmiany w wyniku doświadczenia, wpływu otoczenia lub zmian wynikających z deprivacji sensorycznej lub stymulacji. Zmiany w fizjologicznych i/lub anatomicznych właściwościach centralnego układu słuchowego (plastyczność neuronalna) mogą być indukowane także przez jednostronny lub obustronny niedosłuch odbiorczy, stymulację słuchową i warunkowanie, w którym dźwięki są wykorzystywane jako bodźce warunkowe. Te rodzaje plastyczności neuronalnej mają wpływ np. na korzystanie z aparatów słuchowych, implantów ślimakowych, procesy adaptacji i efekty deprivacji. Występowanie plastyczności wywołanej utratą słuchu sugeruje, że organizacja centralnego układu słuchowego może ulec zmianie do czasu dopasowania aparatu słuchowego i/lub implantu/ów ślimakowych. Sukces może zatem zależeć od tego, jak układ słuchowy reaguje na ponowne wprowadzenie pewnych dźwięków poprzez wzmocnienie⁵ (Willott, 1996; Tye-Murray, w druku).

⁵ Np. zwiększona stymulacja słuchowa zapewniana przez aparaty słuchowe/implanty ślimakowe może indukować „wtórną” plastyczność w układzie słuchowym, co może przyczyniać się do aklimatyzacji i/lub efektów deprivacji. Takie zmiany funkcjonalne mogą być dalej modulowane przez wzmacnianie odpowiedzi na ponownie wprowadzone dźwięki za pomocą technik warunkowania.

James F. Willott (1996) wskazuje na trzy istotne powody, dla których plastyczność mózgu jest szczególnie istotna w przypadku rehabilitacji i stymulacji słuchowej. Po pierwsze, uszkodzenie słuchu może powodować zmiany funkcjonalne w ośrodkowym układzie słuchowym, a tym samym zmiany, które mogą wpływać na odbiór mowy⁶. Po drugie, otrzymanie aparatu słuchowego lub implantu ślimakowego może prowadzić do wtórnej plastyczności mózgu i wtórnych zmian w percepcji mowy⁷. Po trzecie, w wyniku treningu słuchowego w centralnym układzie słuchowym mogą wystąpić zmiany neuronalne⁸.

6. Wnioski

Możliwości słuchowe dziecka mają istotne znaczenie dla jego rozwoju nie tylko w zakresie mowy (nadawania i odbioru), ale także są ważne dla rozwoju wielu innych obszarów. Współczesne badania jednoznacznie wskazują na trudności w zakresie funkcjonowania w przypadku deprywacji słuchowej, uszkodzeń słuchu czy też w sytuacji zaburzeń z zakresu przetwarzania słuchowego. Należy mieć na uwadze, że ze względu na czynniki wewnętrzne, środowiskowe, genetyczne, a także doświadczenia jednostki funkcje układu słuchowego będą się zmieniały. Układ słu-

⁶ Badania Dietrich i in. (2001) potwierdzają, że osoby, które doznały nagłego uszkodzenia słuchu dla częstotliwości wysokich, mają inną mapę tonotopową pierwotnej kory słuchowej niż osoby o prawidłowym słuchu. Pokazuje to, że u osób z utratą słuchu obszary mózgu, które wcześniej reagowały na wysokie częstotliwości, zaczęły teraz reagować na najwyższą częstotliwość nadal mającą normalny próg. Dodatkowo badania Thai-Van i in. (2010) wskazały, że kora słuchowa osób niesłyszących z co najmniej 3-miesięcznym doświadczeniem korzystania z implantu ślimakowego jest zorganizowana w sposób podobny do tonotopii opisanej u osób normalnie słyszących.

⁷ Tye-Murray i in. (1992) testowali zdolność pacjentów do rozpoznawania słów po miesiącu korzystania z implantu ślimakowego, a następnie po dziewięciu miesiącach. Średnio wyniki wzrosły o prawie 10 punktów procentowych, co sugeruje, że pacjenci nauczyli się postrzegać sygnał elektryczny jako funkcję ekspozycji. Niektórzy pacjenci wykazali poprawę nawet po 18 miesiącach doświadczenia. Badania Shella i in. (w druku) wskazują, że identyfikacja dźwięków otoczenia jest jedną z najważniejszych korzyści i wczesnych rezultatów u dzieci zaimplantowanych. Percepcja dźwięków otoczenia stale, ale stopniowo rozwija się wraz ze wzrostem wieku korzystania z implantu.

⁸ Wskazują na to m.in. badania: Loo i in. (2016); Bigras i in. (w druku); Rodgers i in. (2022); Luís i in. (2022).

chowu zmienia się i dostosowuje do doświadczeń przez całe życie, a jego zadania związane z uczeniem się mają dużą użyteczność w zakresie badań klinicznych i wykorzystania ich w praktyce.

Bibliografia

- Bigras, J., Lagacé, J., El Mawazini, A. i Lessard-Dostie, H. (w druku). Interventions for School-Aged Children with Auditory Processing Disorder: A Scoping Review. *Healthcare*, 12(12), 1161.
- Ching, T.Y.C., Dillon, H., Leigh, G. i Cupples, L. (2018). Learning from the Longitudinal Outcomes of Children with Hearing Impairment (LOCHI) study: summary of 5-year findings and implications. *International Journal of Audiology*, 57(sup2), S105–S111. DOI: <https://orcid.org/10.1080/14992027.2017.1385865>.
- Cieszyńska-Rożek, J. (2018). *Neurobiologiczne podstawy rozwoju poznawczego. Śluch*. Kraków: Wydawnictwo Centrum Metody Krakowskiej.
- Dietrich, V., Nieschalk, M., Stoll, W., Rajan, R. i Pantev, C. (2001). Cortical reorganization in patients with high frequency cochlear hearing loss. *Hear Res*, 158(1–2), 95–101. DOI: [https://orcid.org/10.1016/s0378-5955\(01\)00282-9](https://orcid.org/10.1016/s0378-5955(01)00282-9).
- Graven, S.N. i Browne, J. (2008), Auditory Development in the Fetus and Infant. *Newborn and Infant Nursing Reviews*, 8(4), 187–193. DOI: <https://doi.org/10.1053/j.nainr.2008.10.010>.
- Herzyk, A. (2005). *Wprowadzenie do neuropsychologii klinicznej*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar.
- Hull, R.H. (2021). *Introduction to aural rehabilitation: serving children and adults with hearing loss*. San Diego (CA): Plural Publishing.
- Jutras, B., Lagacé, J. i Koravand, A. (2020). The development of auditory functions. W: A. Gallagher, Ch. Bulteau, D. Cohen i J.L. Michaud (red.), *Handbook of Clinical Neurology* (s. 143–155). Elsevier.
- Kolb, B., Harker, A. i Gibb, R. (2017). Principles of plasticity in the developing brain. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 59(12), 1218–1223. DOI: <https://doi.org/10.1111/dmcn.13546>.
- Kuśakowska, Z. (2003). *Wczesne uszkodzenie dojrzewającego mózgu. Od neurofizjologii do rehabilitacji*. Lublin: Wydawnictwo Folium.

- Kurkowski, Z.M. i Kruczyńska, A. (2019). Rozwój funkcji słuchowych. W: E. Muzyka-Furtak (red. nauk.), *Surdologopedia. Teoria i praktyka*. Gdańsk: Harmonia Universalis.
- Loo, J.H, Rosen, S. i Bamiau, D.E. (2016). Auditory Training Effects on the Listening Skills of Children With Auditory Processing Disorder. *Ear Hear*, 37(1), 38–47. DOI: <https://orcid.org/10.1097/AUD.0000000000000225>.
- Luís, C., Abrantes, A., Oliveira, C., Alves, M. i Martins, J.H. (2022). Auditory Processing Intervention Program for school-aged children – development and content validation. *Codas*, 35(1), e20210146. DOI: <https://orcid.org/10.1590/2317-1782/20212021146en>.
- Madell, J. i Hewitt, J. (2023). *From Listening to Language. Comprehensive Intervention to Maximize Learning for Children and Adults with Hearing Loss*. New York (NY): Thieme Medical Publishers, Inc.
- Magimairaj, B.M. i Nagaraj, N.K. (2018). Working Memory and Auditory Processing in School-Age Children. *Language Speech and Hearing Services in Schools*, 49(3), 409–423. DOI: https://orcid.org/10.1044/2018_lshss-17-0099.
- Panasiuk, J. (2016). Uczenie się a mechanizmy neuroplastyczności. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio N – Educatio Nova*, 1.
- Panasiuk, J. (2020). Neurologiczne uwarunkowania rozwoju mowy. W: K. Kaczorowska-Bray i S. Milewski (red. nauk.), *Wczesna interwencja logopedyczna*. Gdańsk: Harmonia Universalis.
- Rodgers, L., Harding, S., Rees, R. i Clarke, M.T. (2022). Interventions for pre-school children with co-occurring phonological speech sound disorder and expressive language difficulties: A scoping review. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 57(4), 700–716. DOI: <https://orcid.org/10.1111/1460-6984.12719>.
- Rouse, M.H. (2020). *Neuroanatomy for speech-language pathology and audiology*. Burlington (MA): MA: Jones & Bartlett Learning.
- Sharma, A., Martin, K., Roland, P., Bauer, P., Sweeney, M. H., Gilley, P. i Dorman, M. (2005). P1 latency as a biomarker for central auditory development in children with hearing impairment. *Journal of the American Academy of Audiology*, 16(8), 564–573. DOI: <https://doi.org/10.3766/jaaa.16.8.5>.

- Shella, T.S., Sasidharan, M. i Lavanya, V. (w druku). Development of Environmental Sound Perception in Children with Cochlear Implant within 4 Months of Implantation. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, 76(4), 3088–3093.
- Thai-Van, H., Veuillet, E., Norena, A., Guiraud, J. i Collet, L. (2010). Plasticity of tonotopic maps in humans: influence of hearing loss, hearing aids and cochlear implants. *Acta Otorhinolaryngologica*, 130(3), 333–337. DOI: <https://orcid.org/10.3109/00016480903258024>.
- Tye-Murray, N., Tyler, R.S., Woodworth, G.G. i Gantz, B.J. (1992). Performance over time with a nucleus or Ineraid cochlear implant. *Ear Hear*, 13(3), 200–209. DOI: <https://orcid.org/10.1097/00003446-199206000-00010>.
- Tye-Murray, N. (w druku). *Foundations of aural rehabilitation. Children, adults, and Their Family Members*. San Diego (CA): CA: Plural Publishing, Inc.
- Willott, J.F. (1996). Physiological plasticity in the auditory system and its possible relevance to hearing aid use, deprivation effects, and acclimatization. *Ear Hear*, 17(3 sup.), 66S–77S. DOI: <https://orcid.org/10.1097/00003446-199617031-00007>.
- Young, P.A., Young, P.H. i Tolbert, D.L. (2020). *Neuroanatomia kliniczna* (wyd. 3). Tłum. J. Dziewiątkowski, I. Klejbor, P. Kowiański, K. Majak i J. Spodnik. Red. nauk. J. Moryś. Wrocław: Wolters Kluwer.