

Streszczenie

Neuroplastyczność to zdolność mózgu do reorganizacji w ciągu życia. Tradycyjnie uważano, że proces ten zachodzi głównie w obrębie poszczególnych systemów zmysłowych w mózgu. Przykładem jest adaptacja kory wzrokowej do nowych bodźców wzrokowych (np. liter) oraz kory słuchowej do nowych bodźców słuchowych (np. muzyki). Jednakże, ostatnie dekady badań dowodzą, że utrata jednego ze zmysłów lub intensywny trening mogą wywołać w mózgu neuroplastyczność międzymodalną, przekraczającą granice systemów zmysłowych (ang. *cross-modal neuroplasticity*). Wciąż niewiele wiemy o tym procesie. Poznanie reguł rządzących neuroplastycznością międzymodalną w ludzkim mózgu było celem czterech badań, przeprowadzonych w ramach mojej rozprawy doktorskiej.

W pierwszym etapie badałem zasady kierujące neuroplastycznością międzymodalną, zachodzącą pod wpływem utraty jednego ze zmysłów. U osób niewidomych, niektóre obszary wzrokowe zmieniają modalność zmysłową w której pracują (np. z wzroku na dotyk), ale nie zmieniają swoich typowych funkcji (np. rozpoznawanie przedmiotów). Czy jest to uniwersalna zasada, obowiązująca także w innych systemach zmysłowych ludzkiego mózgu? Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykorzystałem funkcjonalne obrazowanie rezonansem magnetycznym w celu porównania specjalizacji kory słuchowej do przetwarzania rytmu u osób głuchych oraz słyszących. Okazało się, że rytm przetwarzany wzrokowo angażuje w korze słuchowej osób głuchych te same obszary, co rytm przetwarzany słuchowo u osób słyszących. Pokazuje to, że zmiana modalności zmysłowej, przy jednoczesnym zachowaniu typowej funkcji danego obszaru, może być generalną zasadą, kierującą międzymodalną neuroplastycznością pod wpływem utraty jednego ze zmysłów.

W drugim etapie badałem reguły rządzące neuroplastycznością międzymodalną w korze wzrokowej osób dysponujących wszystkimi zmysłami, występującą pod wpływem treningu. Wykorzystałem funkcjonalne obrazowanie rezonansem magnetycznym, spoczynkowe, funkcjonalne obrazowanie rezonansem magnetycznym, a także przezczaszkową stymulację magnetyczną, do prześledzenia zmian w mózгах dorosłych, widzących osób, zaangażowanych w dziewięciomiesięczny trening czytania za pomocą alfabetu brajla. Pod wpływem treningu kora wzrokowa osób badanych zaangażowała się w proces czytania dotykowego. Najsilniejszą aktywność w trakcie tej czynności zaobserwowałem w tzw. obszarze formy wzrokowej słów (ang. *visual word form area*) – części brzusznej kory wzrokowej, która jest niezwykle istotna dla czytania wzrokowego, u osób widzących, oraz czytania dotykowego, u osób niewidomych. W trakcie treningu, obszar ten zwiększył również siłę swoich połączeń funkcjonalnych (ang. *functional connectivity*) z korą somatosensoryczną. Zaburzenie aktywności obszaru formy wzrokowej słów za pomocą przezczaszkowej stymulacji magnetycznej spowodowało pogorszenie umiejętności czytania brajlem u osób badanych. Te wyniki dowodzą, że neuroplastyczność międzymodalna, występująca pod wpływem treningu, jest mechanizmem adaptacyjnym, wspierającym efektywne wykonywanie trenowanych czynności. Sugerują również, że podobne zasady rządzą neuroplastycznością międzymodalną u osób widzących oraz niewidomych.

W trzecim etapie badałem anatomiczne korelaty neuroplastyczności międzymodalnej. W tym celu, analizie poddane zostały dane anatomiczne, uzyskane za pomocą strukturalnego obrazowania rezonansem magnetycznym, w trakcie przeprowadzonego w drugim etapie treningu brajla dla osób widzących. Pod wpływem treningu nastąpiła reorganizacja istoty szarej oraz istoty białej w przedniej części wczesnej (tj. pierwszorzędowej oraz drugorzędowej) kory wzrokowej. Dodatkowe analizy z wykorzystaniem spoczynkowego, funkcjonalnego rezonansu magnetycznego pokazały, że ten fragment kory wzrokowej wykazywał silniejsze niż sąsiednie obszary połączenia funkcjonalne z korą somatosensoryczną, już przed rozpoczęciem treningu czytania brajlem. Te wyniki pokazują, że neuroplastyczność międzymodalna, występująca pod wpływem treningu w korze wzrokowej, jest związana z komplementarną, anatomiczną reorganizacją tego systemu zmysłowego. Reorganizacja istoty białej, zaobserwowana we wczesnej korze wzrokowej, sugeruje, że obszar ten może być zaangażowany w transfer informacji dotykowej do systemu wzrokowego. Wystąpienie reorganizacji anatomicznej w części kory wzrokowej, która jeszcze przed rozpoczęciem treningu była preferencyjnie skomunikowana z korą somatosensoryczną, może świadczyć o tym, że międzymodalna neuroplastyczność ludzkiej kory wzrokowej jest wspierana przez połączenia istoty białej wykształcające się naturalnie, w typowym rozwoju.

W czwartym etapie badałem przestrzenno-czasową dynamikę zaangażowania typowo funkcjonującej kory wzrokowej w proces czytania dotykowego. Nowa grupa dorosłych, widzących osób została zaangażowana w trening czytania alfabetem brajla, a następnie w eksperyment z wykorzystaniem przezczaszkowej stymulacji magnetycznej, prowadzonej w różnych oknach czasowych (tzw. chronometryczna przezczaszkowa stymulacja magnetyczna). Osoby badane czytały na głos pojedyncze litery brajlowskie, podczas gdy kolejno stymulowane były trzy struktury mózgowe: wczesna kora wzrokowa, obszar formy wzrokowej słów oraz wczesna kora somatosensoryczna. Stymulacja każdej struktury prowadzona była w pięciu różnych oknach czasowych, pokrywających razem okres od 20 do 520 ms po rozpoczęciu prezentacji litery brajlowskiej. Poprawność rozpoznawania liter brajlowskich obniżyła się podczas stymulacji wczesnej kory wzrokowej, 120-220 ms po prezentacji litery, oraz podczas stymulacji obszaru formy wzrokowej słów, 320-420 ms po prezentacji litery. Ta przestrzenno-czasowa, podwójna dysocjacja pokazuje, że w normalnie funkcjonującej korze wzrokowej, bodźce dotykowe mogą być przetwarzane w hierarchii typowej dla bodźców wzrokowych. Zaangażowanie zarówno wczesnej kory wzrokowej jak i obszaru formy wzrokowej słów w proces rozpoznawania liter brajlowskich sugeruje, że potencjalnie cały system wzrokowy może angażować się w przetwarzanie informacji z innych modalności zmysłowych.

Niniejsza rozprawa stanowi próbę kompleksowego zbadania zjawiska neuroplastyczności międzymodalnej, w różnych systemach zmysłowych (kora słuchowa, ora wzrokowa), różnych grupach badawczych (osoby głuche, osoby dysponujące wszystkimi zmysłami) oraz z wykorzystaniem różnych metod i poziomów opisu (strukturalne obrazowanie rezonansem magnetycznym – zmiany anatomiczne; funkcjonalne obrazowanie rezonansem magnetycznym – zmiany funkcjonalne; przezczaszkowa stymulacja magnetyczna – związek z zachowaniem). Jej wyniki sugerują, że podobne reguły rządzą neuroplastycznością międzymodalną w deprivacji zmysłowej oraz zachodzącą pod wpływem treningu – w szczególności, w obydwu przypadkach, proces ten zmienia modalność zmysłową wybranych obszarów mózgu, a nie zmienia ich typowego zadania. Przedstawiony program badawczy

pokazuje również, że neuroplastyczność międzymodalna zachodząca pod wpływem treningu jest procesem adaptacyjnym, wspierającym skuteczne wykonywanie trenowanej umiejętności, a także po raz pierwszy wiąże te zjawisko z mechanizmami anatomicznymi. Uzyskane wyniki dowodzą, że wbrew tradycyjnym poglądom na neuroplastyczność oraz funkcjonalną organizację mózgu, podział tego organu na systemy zmysłowe jest zaskakująco podatny na zmiany. Tym samym, przedstawiona praca przyczynia się do lepszego zrozumienia reguł rządzących rozwojem oraz funkcjonowaniem ludzkiego mózgu.